

クロマグロの種苗生産に関する研究*¹

宮 下 盛

Studies on the Seedling Production of the Pacific Bluefin Tuna, *Thunnus thynnus orientalis*

Shigeru MIYASHITA*²

目 次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 緒 論 | 4 |
| 第 I 章 養成クロマグロの成熟と産卵 | 8 |
| I -1. 親魚の成長および成熟 | 8 |
| I -1-1. 材料および方法 | 8 |
| I -1-2. 結果 | 10 |
| I -1-3. 考察 | 16 |
| I -2. 自然産卵 | 17 |
| I -2-1. 材料および方法 | 17 |
| I -2-2. 結果 | 17 |
| I -2-3. 考察 | 21 |
| I -3. 精子および卵膜の構造 | 25 |
| I -3-1. 材料および方法 | 25 |
| I -3-2. 結果 | 25 |
| I -3-3. 考察 | 26 |
| 第 II 章 卵発生および孵化 | 29 |
| II -1. 卵発生および孵化に及ぼす水温の影響 | 29 |
| II -1-1. 材料および方法 | 29 |
| II -1-2. 結果 | 31 |
| II -1-3. 考察 | 39 |
| II -2. 卵発生に伴う化学成分および酵素活性の変動 | 41 |
| II -2-1. 材料および方法 | 41 |

*¹ 本論文は近畿大学審査学位論文である。

*² 白浜実験場 (Fisheries Laboratory, Kinki University, Shirahama, Nishi-muro, Wakayama 649-2211, Japan)

| | |
|--------------------------------------|-----|
| II-2-2. 結果 | 42 |
| II-2-3. 考察 | 43 |
| 第III章 仔稚魚の発育 | 48 |
| III-1. 発育に伴う外部形態の変化 | 48 |
| III-1-1. 仔魚期から稚魚期 | 48 |
| III-1-1-1. 材料および方法 | 48 |
| III-1-1-2. 結果 | 50 |
| III-1-1-3. 考察 | 63 |
| III-1-2. 稚魚期から若魚期 | 68 |
| III-1-2-1. 材料および方法 | 68 |
| III-1-2-2. 結果 | 70 |
| III-1-2-3. 考察 | 78 |
| III-2. 発育に伴う内部形態の変化 | 81 |
| III-2-1. 消化系の発達 | 81 |
| III-2-1-1. 材料および方法 | 81 |
| III-2-1-2. 結果 | 82 |
| III-2-1-3. 考察 | 91 |
| III-2-2. 筋肉形成 | 93 |
| III-2-2-1. 材料および方法 | 93 |
| III-2-2-2. 結果 | 95 |
| III-2-2-3. 考察 | 100 |
| III-3. 発育に伴う酸素消費量の変動 | 101 |
| III-3-1. 材料および方法 | 101 |
| III-3-2. 結果 | 105 |
| III-3-3. 考察 | 107 |
| 第IV章 稚魚期以降の突進遊泳と衝突死 | 110 |
| IV-1. 遊泳行動およびその能力に関する外部器官の形態変化 | 110 |
| IV-1-1. 材料および方法 | 111 |
| IV-1-2. 結果 | 115 |
| IV-1-3. 考察 | 123 |
| IV-2. 衝突による骨格損傷とその多発期 | 126 |
| IV-2-1. 材料および方法 | 126 |
| IV-2-2. 結果 | 126 |
| IV-2-3. 考察 | 129 |
| 第V章 クロマグロの種苗生産 | 133 |
| V-1. 採卵 | 133 |

宮下：クロマグロの種苗生産に関する研究

| | |
|---------------------------------|-----|
| V-2. 孵化 | 135 |
| V-3. 初期飼育 | 136 |
| V-4. 中間育成 | 144 |
| V-5. 人工種苗の実用化および親魚養成-完全養殖 | 147 |
| 要 約 | 148 |
| Summary | 152 |
| 謝 辞 | 156 |
| 文 献 | 156 |

結 論

サバ科に属するマグロ類は、一般的に、クロマグロ, *Thunnus thynnus*, メバチ, *Thunnus obesus*, キハダ, *Thunnus albacares*, ビンナガ, *Thunnus alalunga*, ミナミマグロ, *Thunnus maccoyii*, タイセイヨウマグロ, *Thunnus atlanticus* およびコシナガ, *Thunnus tonggol* の7種に分類される¹⁴⁾。マグロ類は旋網, 延縄, 定置網, 流し網, 曳縄および竿釣などで漁獲され, FAOの統計によると, 世界における1990年前後の年間総漁獲量は約150~160万tである。日本では水産庁の統計によれば, そのうち30万t前後を漁獲している。日本のマグロ漁業の生産量は, 1998年度でみると海面漁業における総生産量の約5%, 生産額では約14%に当たる。魚種別にみるとメバチ, キハダ, ビンナガが主であり, 1978年には12%であったクロマグロの占める割合は年々減少し, 最近では約2%と著しく低い^{4, 5)}。

クロマグロは, マグロ類中最も大型で, 全長3m内外, 体重500kg前後に達し, 最大の記録は北西大西洋で釣獲されたもので, 尾叉長304cm, 体重679kgである⁶⁾。地中海, 大西洋および太平洋の温帯海域を中心に全世界に分布する^{6, 8)}が, 太平洋クロマグロ, *T. thynnus orientalis* (Temminck and Schelegel) は, 分類学的には大西洋クロマグロ, *T. thynnus thynnus* Linnaeusの亜種にあたると主張されてきており^{1, 9)}, 最近, ミトコンドリアDNAの解析から, これらの2亜種間の生殖隔離が示された¹⁰⁾。Collette¹¹⁾は形態学および遺伝学的相違から, 大西洋クロマグロを*T. thynnus*, 太平洋クロマグロを*T. orientalis*と別種にするのが適当であろうと提唱している。

太平洋クロマグロは, 太平洋の東西両岸間で大洋横断回遊を行うが, メバチ, キハダ, ビンナガなどと異なって, 産卵海域は南西諸島を中心とする日本近海に限られ, 産卵回帰性が強いといわれる^{6, 12)}。従ってクロマグロは, 日本の栽培漁業対象種としてマグロ類の中で最も有望と考えられる。

ところで, 日本では本種を縄文時代から食していたといわれるが, 美味であるうえ漁獲量が少ないため, マグロ類中最高級魚で商品価値が極めて高い¹³⁾。それ故, 日本では世界中からクロマグロを輸入し, 全漁獲量の50%以上を消費している。ゆえに, 乱獲による資源枯渇が懸念され, 国際的な資源管理への関心が年毎に高まりつつある。1992年には, 京都で開催された第8回ワシントン条約会議に大西洋クロマグロの規制がスウェーデン政府より提案されるに至った。採択こそされなかったものの, 同条約に採択されれば商業目的の漁業および取引が全面禁止となる可能性もあることから今後の動向が危惧される。さらに, 今まで漁獲規制のなかった太平洋クロマグロについても, 2000年9月4日には, ハワイで開催された「第7回中西部太平洋における高度回遊性魚種資源の保存管理に関する多国間ハイレベル会合」で, マグロ類の資源保存管理の枠組みを定めた条約が採択され, 今後のクロマグロ種苗(ヨコワ)の採捕も含めて極めて重大な局面を迎えつつある。

一方, このような背景の中で, 海外では大型個体を採捕して比較的短期間飼育する蓄養が行われ, 日本に輸出されている。海外での蓄養は, その多くが日本の関係機関によって指導・開発されてきたものであり, その始まりは1975年にカナダ東岸で開始された大西洋クロマグロの蓄養事例であろう¹⁴⁾。これは, 7月頃定置網に入網する産卵後の肉質の悪い大型マグロを活け込んで,

冬まで蓄養した後、日本へ輸送するというものである。地中海においても、スペインで 1985 年から蓄養事業が始まっており、その生産量は 1998 年の 1,550 t に対して、1999 年度は 5,300 t と推測され、急増している¹⁵⁾。また、地中海での蓄養はモロッコやクロアチアなどでも開始されている。さらに、オーストラリアでは、旋網で漁獲された体重 15 kg 前後のミナミマグロを蓄養する事業が 1990 年からポートリンカンを中心にボストン湾で行われており、1999 年度の生産量は 7,000 t と推測されている^{16, 17)}。このように海外で蓄養されているマグロの殆どは日本へ輸出されるが、1999 年度におけるこれらの総量は、日本の推定養殖生産量より遙かに多い 1 万数千 t に達する見込みである。なお、日本の養殖生産量は 300 t と 1,000 t と いわれるが、この種苗には、後述するように“ヨコワ”と称される天然産幼魚（0 歳魚）を採捕して用いている。

このように本種は、主要消費国である日本にとっても重要魚種であり、その天然資源増強技術の開発が重要である。また同時に、養殖生産量増大への取り組みも必要となるが、その種苗を天然産に依存しているのでは資源管理上問題であり、今後は、先に述べたような国際資源管理体制によって天然種苗の採捕が規制される可能性も高い。従って、マグロ漁業・養殖業の発展のためには、種苗生産技術の開発が不可欠であり急務である。しかし、クロマグロについての研究は、資源学的、生物学的には以前から数多く行われてきたものの、増養殖に関しては、本種の産卵場が遠く天然親魚からの採卵が困難で、親魚養成も成魚が巨大で扱いが困難なうえ、大がかりな飼育施設を要することから、1970 年まで手つかずの状態が続き、将来の夢とされてきた。

クロマグロ増養殖への取り組みは日本で最初に行われた。水産庁が企画して 1970 年に開始した「有用魚類大規模養殖実験事業」である。これは、経済水域 200 海里時代を迎えるに当たって、日本漁業の衰退を危惧しての施策であり、事業の対象種としてサケ、*Oncorhynchus keta*, タラバガニ、*Paralithodes camtschatica* およびクロマグロの 3 種が挙げられた^{17, 18)}。クロマグロについては、遠洋水産研究所を中心とした 3 ケ年のプロジェクト研究「マグロ類養殖技術開発試験」が開始され、近畿大学水産研究所は、東海大学、静岡県水産試験場、三重県水産試験場、長崎県水産試験場とともにこれに参画することになった。そしてこれを機に、和歌山県串本町大島にクロマグロ養殖実験基地を開設した。なお、同プロジェクト研究には、その後 1971 年から高知県水産試験場が、1974 年から鹿児島県水産試験場がそれぞれ加わった。当初のプロジェクト研究の方針は、クロマグロ親魚が巨大であるとともに採捕場所が遠く、熟卵保有個体の入手が不可能に近かったことから、養成親魚からの自然産卵を目指すものであった。すなわち、①日本列島沿岸に來遊する幼魚“ヨコワ”を活け込んで飼育し、養殖および採卵用親魚養成技術を開発する。②養成親魚からの採卵が可能になるまで、旋網または定置網で漁獲されるマグロ類およびその近縁種からの採卵を試み、人工孵化および飼育技術を開発する。という 2 面立てで取り組まれた。その成果として、クロマグロの網生簀養殖の可能性が示唆され¹⁹⁻²³⁾、キハダ^{24, 25)}、マルソウダ、*Auxis tapeinosoma*²⁶⁾、ヒラソウダ、*Auxis thazard*²⁷⁾ およびハガツオ、*Sarda orientalis*²⁸⁾ などのサバ型魚類の人工孵化および稚魚までの飼育成功が報告された。その後、このプロジェクトは 1980 年から 1988 年まで行われたマリンランニング計画に引き継がれ、この間に養殖の可能性が実証され^{29, 30)}、(社) マリノフォーラム 21 の養殖試験が 1992 年から始まった。これら事例の集積からマグロ養殖の有望性が認められ、1985 年からこれに取り組む民間養殖業者も出現し始めた。

この間、近畿大学水産研究所では、1970 年に白浜実験場でヨコワの活け込み試験を開始し、翌 1971 年からは串本町大島に開設した大島分室にその実験場所を移した²¹⁾。以来、30 年間にわ

たつて同分室で親魚養成および産卵の研究が続けられてきた。その結果、1979年に満5歳となった1974年級群クロマグロの生簀内における自然産卵に世界で初めて成功²⁹⁾するとともに、採取した卵を孵化・飼育して、孵化後47日目、全長57mmにまで成長させた³¹⁾。しかし、その後の自然産卵は、1980年(満6歳)および1982年(満8歳)に認められた後中断し、1982年に孵化後57日目、全長79mm(最大個体は孵化後49日目、全長98mm)の飼育記録を残したまま、種苗生産技術の開発も休止状態となった。

その後、クロマグロの自然産卵による採卵は、1992年から株式会社マルハが奄美大島で³²⁾、日本配合飼料株式会社が愛媛県内海村で³³⁾、それぞれ成功しており、日本栽培漁業協会でも奄美事業場で1997年から行われている。しかし、その自然産卵は依然として甚だ不安定であり、仔稚魚の飼育についての報告もあるが^{34, 35)}、量産はもとより、初期飼育の域を出ず、養殖用種苗として役立つ大きさまで育てるに至っていない。なお、オーストラリアではミナミマグロの種苗生産が試みられている³⁶⁾。

これらの結果と、既往の多くの海産魚種の種苗生産事例からすると、それらの魚種に比べてクロマグロの生理生態学的特異性が窺われ、本種の種苗生産がかなり困難なものであることが推察される^{37, 38)}。従って、クロマグロの種苗生産技術開発のためには、さらに多くの基礎知見の集積が必要と考えられる。

以上の観点から、本研究では1987年級親魚群を養成し、自然産卵によって採取した受精卵を供試して、クロマグロ仔稚魚の发育過程における種々の形態学および生理生態学的特性を明らかにするとともに、その完全養殖への足がかりを得るために種苗生産を試みた。

第I章では、養成クロマグロの成長と成熟について調査し、生殖腺の成熟状態および産卵行動を観察した。この結果と野生種の産卵生態に関する既往の知見から、和歌山県串本町大島海域における産卵条件を検討した。また、精子と卵膜の構造を明らかにした。

第II章では、卵内発生を観察し、発生速度および孵化に及ぼす水温の影響を調べ、孵化適水温を検討した。また、卵の発生に伴う化学成分および酵素活性の変動を調べた。

第III章では、仔稚魚の絶対成長と相対成長を明らかにするとともに、成長に伴う外部形態の変化並びに消化系器官の発達および消化酵素活性を調べた。また、遊泳推進力を生み出す組織である体側筋の発達を調べた。さらに、閉鎖的環境における安全な飼育を行う上で必要な指標として、成長に伴う酸素消費量の変動を調べた。

第IV章では、クロマグロの種苗生産において最大の課題である稚魚期以降の突進遊泳による衝突死の原因究明とその防除対策に資するため、成長に伴う遊泳行動の変化を観察するとともに、遊泳能力に関係の深い外部諸器官の发育過程を調べた。そして、衝突死による骨格の損傷状態を観察するとともに、その頻発時期を調べ、これらの結果と第III章の結果から稚魚期における衝突死の原因について検討した。

第V章では、クロマグロの採卵、陸上水槽における初期飼育、海面生簀での中間育成の全種苗生産過程の各技法について、それぞれ検討を加えた。

— 本文中の用語に関する定義 —

多くの魚類における近年の放流用および養殖用種苗サイズは、一般的に全長 5～10 cm である。従って、種苗生産における中間育成期間は、陸上水槽で全長 1～3 cm まで飼育された後から全長 7 cm 内外までの間である。しかし、クロマグロについては、全長約 5 cm から 20 cm までの間に飼育施設への衝突死が多発することから、この間の幼魚を実用養殖種苗として用いるのは困難である。また、現在のところ、クロマグロの養殖用種苗にはすべて天然産が用いられており、そのサイズは全長約 20 cm 以上である。そこで、本種の種苗サイズは全長 20 cm 以上と仮定し、本研究における中間育成の期間は、全長約 5 cm から約 25 cm までの間と定義する。

魚類の発育段階を外部形態の発達状態のみで区分することは必ずしも適切とはいえないが、便宜上、外部形態に基づいて区分することが多い³⁹⁾。本研究においても、発育段階に対応した餌料系列や減耗期など、増養殖上重要な諸問題を述べる上でこれを用いないと不便である。そこで、クロマグロの発育段階についても、日本で従来から用いられている区分法（前期仔魚-後期仔魚-稚魚-若魚-未成魚-成魚-老魚）^{40, 41)}に従って使用する。なお、初期発育については、尾鰭の形成を重視した区分法が海外で広く採用されている。そこで、形態学的研究の項目では、上記の発育段階における後期仔魚を上屈前仔魚（*preflexion*）-上屈仔魚（*flexion*）-上屈後仔魚（*postflexion*）の三段階に区分して用いる。

また、魚体の大きさを長さで表す方法には、全長（Total length, TL）・標準体長（Standard length, SL）・尾叉長（Fork length, FL）などがあり、SL は単に体長（Body length, BL）ともいう⁴²⁾。魚類における多くの既往の報告では、形態学的研究では BL（または SL）を基準とするが、種苗生産に関する研究では初期飼育に TL、親魚に FL を、マグロ類の資源学的研究では FL を、それぞれ用いている例が多い。本研究では、研究現場での利便性を考慮し、親魚養成に関する項目では尾叉長（FL）を、種苗生産に関する項目では全長（TL）を、形態学的研究の項目では体長（BL）をそれぞれ用いることにした。

第1章 養成クロマグロの成熟と産卵⁴³⁾

種苗生産を行うためには、まず良質な受精卵を大量に安定して採取することが必要であり、養成親魚からの採卵技法の開発が不可欠である。しかし、養成クロマグロの自然産卵は、近畿大学水産研究所⁴⁴⁾で1979年に初めて成功して以来、株式会社マルハ³²⁾、日本配合飼料株式会社⁴⁵⁾および日本栽培漁業協会奄美事業場でもそれぞれ成功しているが、これらの詳細についての報告はなく、安定採卵という点で問題も多い。

一方、本種または亜種の大西洋クロマグロの野生種の産卵場と産卵期に関しては、大西洋および地中海における Rivas⁴⁶⁾、Tiews⁴⁷⁾、Sara⁴⁸⁾、Piccinetti⁴⁹⁾、太平洋における Kishinoue⁵⁰⁾、中村^{51, 52)}、Yamanaka⁵³⁾、矢部ら⁵⁴⁾、上柳^{55, 56)}、沖山⁵⁷⁾、依田⁵⁸⁾、西川^{59, 60)}など多くの報告があるが、いずれも漁獲親魚の生殖腺の観察や、仔魚の採集結果などの断片的な知見から推察されたものである。

従って、産卵開始および終了の環境条件についても明らかでなく、生殖腺の状態や産卵期間、産卵行動についての知見も十分ではない。そこで、養成親魚からの採卵技術向上のための知見集積の一環として、串本町大島における親魚の成長、成熟度の周年変化と自然産卵、産卵行動⁶¹⁾、産卵時刻直前における生殖腺の性状、精子および卵膜の構造⁶²⁾などを明らかにする目的で本研究を行った。

I-1. 親魚の成長および成熟

I-1-1. 材料および方法

親魚養成用の種苗である天然産の幼魚は、紀伊半島沿岸では毎年8月を盛期に來遊する。その大きさは全長20~30 cmが主体であるが、本研究における孵化仔魚からの飼育結果から推定すると、これらの個体は孵化後2~3ヶ月齢に相当し、孵化時期は5~6月と推定できる。著者らは、1970年以来毎年幼魚を曳き縄釣りによって採捕し、近畿大学水産研究所大島分室の網生簀に活け込んで親魚まで養成する実験を行ってきた。本研究の供試0歳魚にもこれを用いたが、その活け込み期間は、1987年8月2日から9月11日までの41日間であった。この間に採捕された3,221尾を、一辺12×12×深さ6 m、目合い8節の網生簀に収容して馴致飼育を行った。活け込み1週間後まで生残した2,354尾を本実験における開始尾数とした。

種苗の活け込み開始2ヶ月後には、一辺31×31×深さ11 m、目合い4節の化繊網生簀に移して養成を開始した。生簀の設置場所はFig. I-1に示す通り、紀伊半島南端の和歌山県串本町大島の西岸に位置する。

飼育餌料はTable I-1に示すように、0~2歳では主としてイワシ類およびイカナゴ、*Ammodytes personatus*を、3~5歳では主としてイワシ類を用い、成長に伴ってアジ類、サバ類、およびイカ類を加えた。6歳からは主にサバ類を用い、アジ類およびイカ類をこれに加えたが、これらの餌料は原則として1週間に5, 6日、1日に1, 2回飽食するまで給餌した。

串本大島海域における成熟過程を明らかにするために、生殖腺体指数(GSI)の季節変動を調べた。調査期間は、同地におけるクロマグロの成熟年齢を原田ら⁴⁴⁾の結果から満5歳前後と想

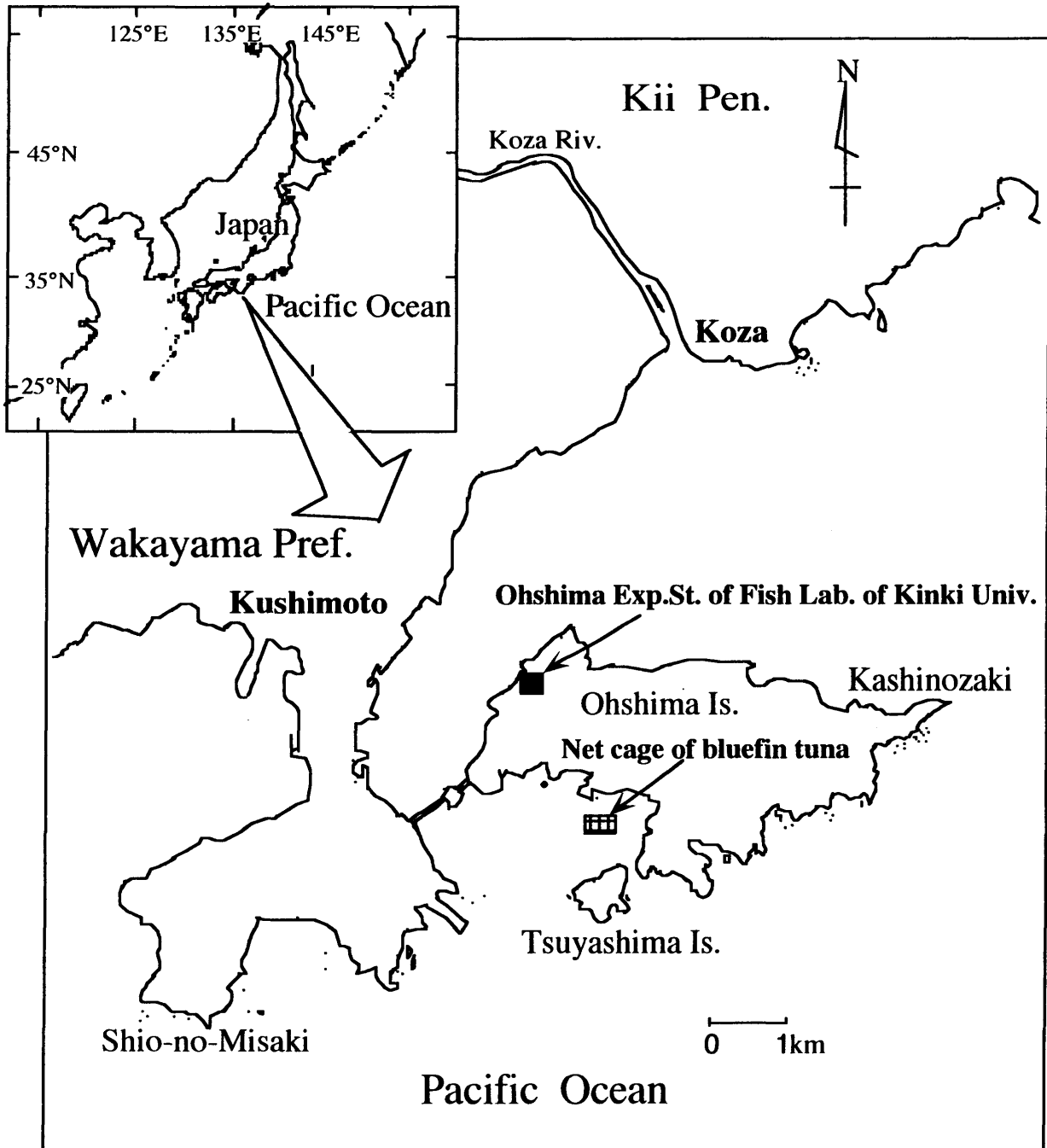


Fig. I -1. Location of the Pacific bluefin tuna farm.

定し、同年齢を迎える 1992 年以降とした。クロマグロは擦れ易く扱いが困難なため、調査は釣りによって随時取りあげる間引き時に行った。これらは、それぞれ釣り上げた後に魚体各部を測定後、生殖腺を摘出して計量し、GSI を求めた。GSI は $(\text{生殖腺重量}/\text{体重}) \times 10^2 (\%)$ で表した。なお、肥満度 (CF) は、 $\text{体重} \times 10^3 / \text{体長}^3$ で表した。

一方、7 歳時の産卵期間中であつた 1994 年 7 月 16 日から同月 20 日にかけて、本種の抱卵数および生殖腺の性状を明らかにする目的で、釣りによるサンプリングを行った。釣り上げ時刻は、産卵時刻にできるだけ近い午後 4 時頃とした。生殖腺は、魚体各部を測定した後に摘出した。抱卵数は、右卵巣の前部、中央部、および後部部分をそれぞれ 1 g ずつ切り出して 10%ホルマリン

Table I -1. Feed for the 1987 year class of the Pacific bluefin tuna

| Age | No. of fish in commen- cement | Average body wt. (kg) | Weight of feed (kg) | Sardine (%) | Sand lance (%) | Horse mackerel (%) | Mackerel (%) | Cuttlefish (%) | Others* (%) |
|-------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| 0 | 2,354 | 0.26 | 50,989 | 57.5 | 42.4 | 0.1 | - | - | - |
| 1 | 1,224 | 8 | 117,176 | 85.9 | - | 12.8 | 0.5 | 0.0 | 0.8 |
| 2 | 905 | 12 | 126,058 | 66.5 | - | 1.3 | 7.7 | 0.0 | 24.5 |
| 3 | 765 | 20 | 122,570 | 5.2 | 0.5 | 17.4 | 11.6 | 0.2 | 65.1 |
| 4 | 631 | 30 | 149,101 | 43.5 | - | 15.6 | 35.9 | 0.0 | 5.1 |
| 5 | 598 | 40 | 154,241 | 43.8 | - | 11.1 | 32.3 | 4.3 | 8.5 |
| 6 | 321 | 57 | 155,792 | 6.9 | - | 27.7 | 53.6 | 4.1 | 7.7 |
| 7 | 281 | 75 | 163,303 | 2.5 | - | 11.0 | 77.0 | 9.3 | 0.2 |
| 8 | 171 | 90 | 96,307 | 4.6 | - | 27.4 | 63.2 | 4.7 | - |
| 9 | 99 | 120 | 66,814 | 2.0 | - | 14.9 | 77.0 | 6.0 | 0.1 |
| 10 | 93 | 150 | 82,597 | 0.5 | - | 9.7 | 84.6 | 5.3 | - |
| 11 | 76 | 180 | 74,116 | 0.2 | - | 6.8 | 88.8 | 4.2 | - |
| 12 | 63 | 220 | 41,506 | 3.5 | - | 0.3 | 84.1 | 9.1 | 3.0 |
| Total | - | - | 1,400,570 | 26.8 | 1.6 | 13.5 | 44.3 | 3.5 | 10.4 |

*Bonito etc.

液で固定した後、全ての卵粒を計数して推定した。また、0.2 mm 以上の分離卵粒群の卵径を光学顕微鏡下で計測してその組成を調べ、多回産卵性を検討した。一方、同様に切り出した卵巣の一部をブアン液で固定した後、常法にしたがって組織標本作製し、卵の成熟度を観察した。

I-1-2. 結果

(1) 親魚の成長

親魚養成場における飼育環境の中から、成長、成熟および産卵に関係が深いと思われる環境要因の周年変動を Fig. I-2 に示した。それぞれの値は、1992 年から 1999 年までの 8 年間の平均である。この期間における海水の表面水温、海水比重および透明度の範囲は、それぞれ、13.3～29.7℃、18.50～26.48、2.0～26.0 m であったが、8 年間の平均でみた周年変動は、それぞれ、16～26℃、23.00～25.00、5～17 m の範囲にあった。また、最高水温および最低水温は、それぞれ 8 月下旬および 2 月下旬に観測された。なお、水深 5 m における水温は表面水温と同じかやや低く、その差はほぼ 0.5℃以内であった。供試魚はこのような環境の下で養成した。活け込み当初の尾叉長、体重、および肥満度は、それぞれ 25.5±2.5 cm、260±10 g、17.0±1.4 (平均値±標準偏差、n=10) であった。これを養成したところ、Fig. I-3 に示すように成長し、成熟を想定した満 5 歳を迎えた 1992 年 5 月には、尾叉長 71～164 cm、体重 7～70kg に成長した。その後の尾叉長と体重の変動は、1993 年の 4～5 月 (満 6 歳) には、それぞれ 90～179 cm、13～99 kg、1994 年の 7 月 (満 7 歳) には、それぞれ 107～188 cm、21～140 kg に成長し、1999 年 5～10 月 (満 12 歳) には、それぞれ 204～244 cm、175～272 kg に達した。尾叉長と体長、全長および体重の関係を Fig. I-4 に示した。この間の肥満度は、天然種苗活け込み時には、15～20 の範囲を示したが、以後は約 20～21 を中心に推移し、成長に伴って微増する傾向が認められた。なお、個体による肥満度の差は大きく、おおむね 15～30 の範囲であった。

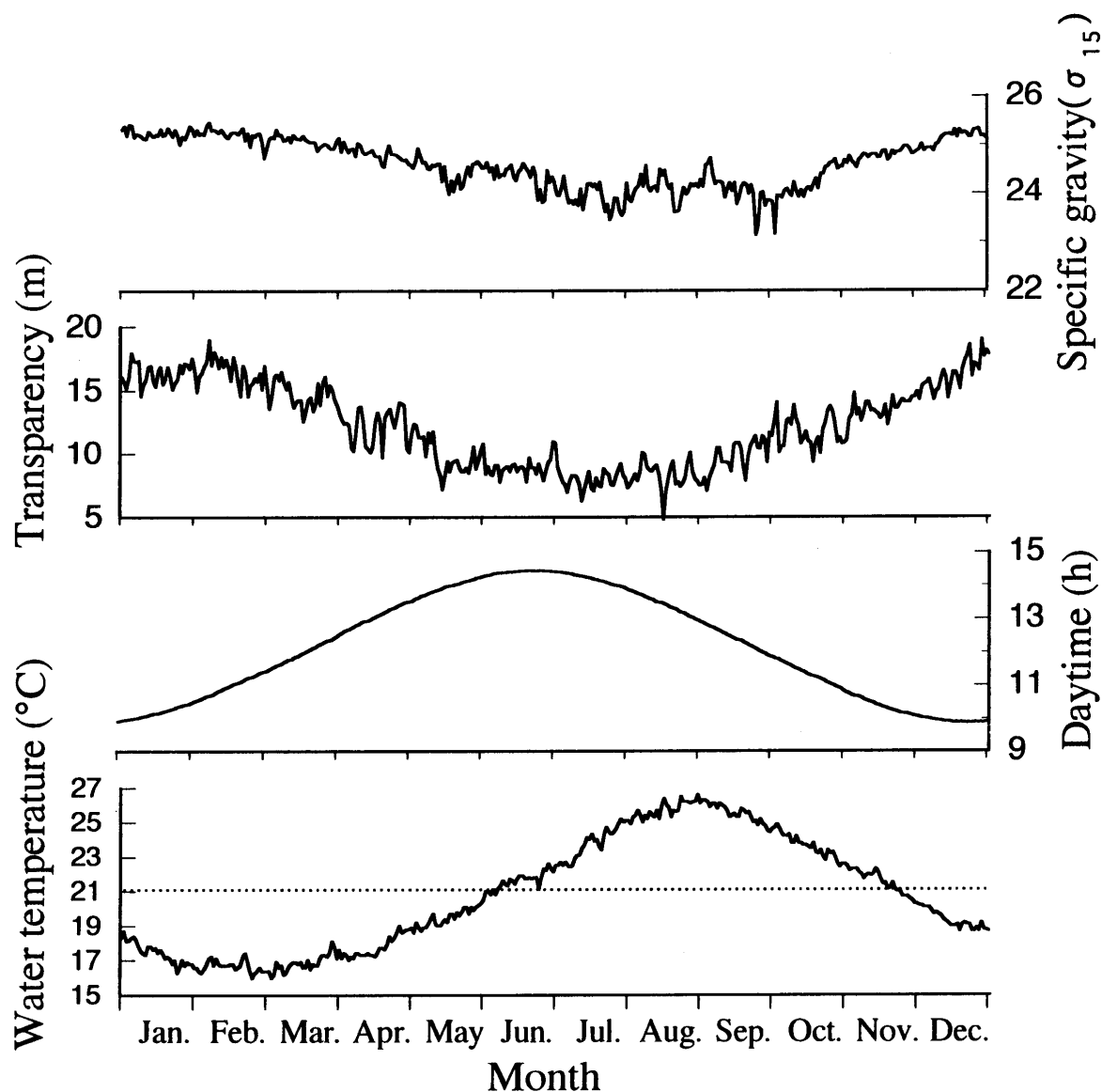


Fig. I-2. Environmental condition at the Pacific bluefin tuna net cage. Values are averaged for 8 years from 1992 to 1999.

(2) 成熟

成熟年齢に相当すると考えられた満5歳、すなわち1992年から8年間、随時サンプリングして生殖腺の熟度の周年変動を調べた。雌雄合わせた調査個体数は、1992年89尾、1993年49尾、1994年11尾、1995年92尾、1996年以後7尾の合計248尾であり、雌雄比は雄：雌=12：13であった。それら全個体のGSIをFig. I-5に示した。

満5歳となった1992年の4月に調査した42尾の雌個体のうち38尾の個体のGSIが1%以下で、最大GSIは1.6%（体重46.4 kg、尾叉長141 cm）であった。この個体の卵巣卵の最も進んだ発育段階は卵黄球期であった。雄の調査個体は32尾であったが、うち25尾の個体のGSIが1%以下であり、最大GSIは2.5%（体重39.7 kg、尾叉長136.5 cm）で、その個体の精巣の小葉腔内には精子が充満していた。しかし、同年および翌1993年に産卵を確認することはできなかった。

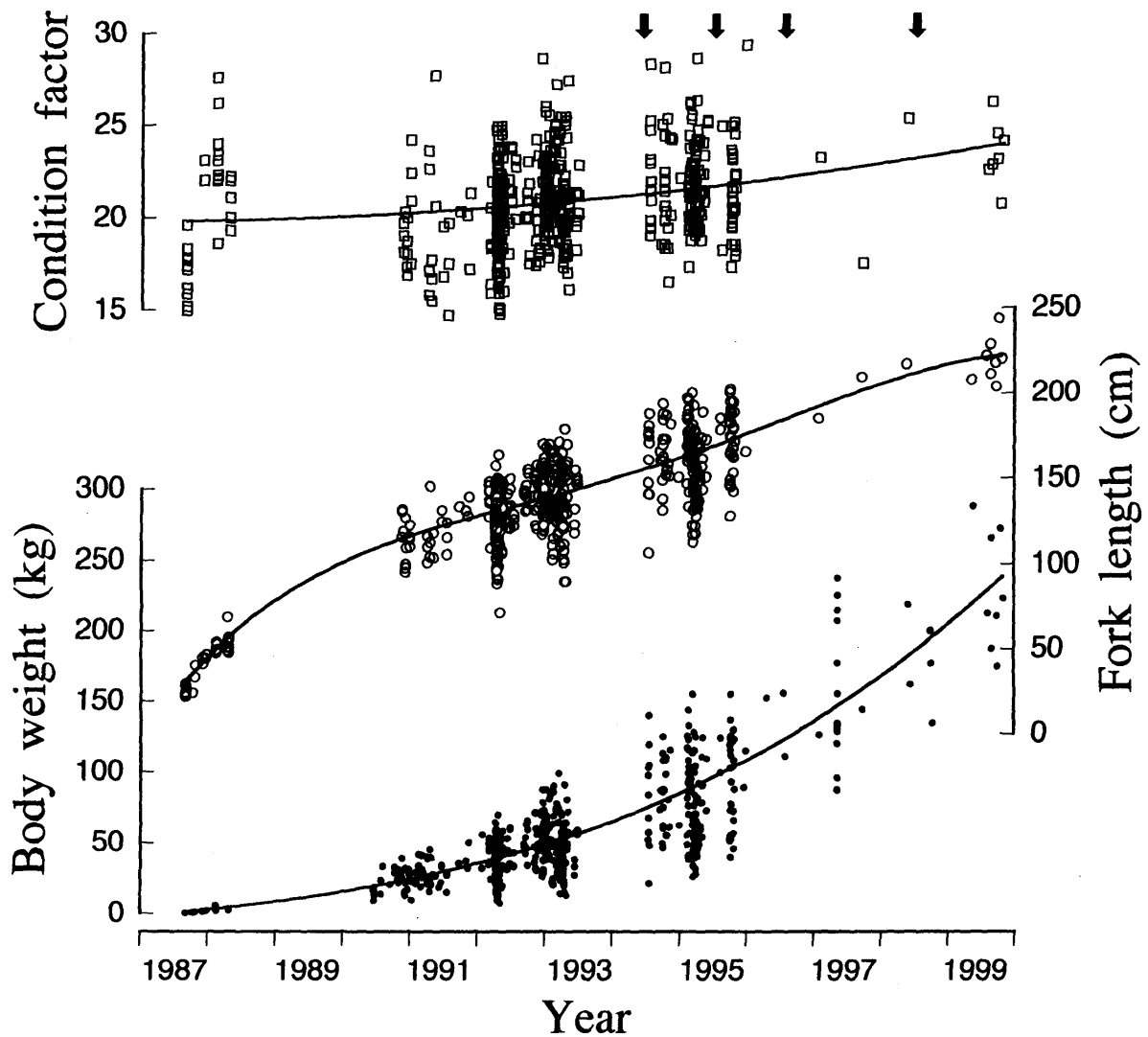


Fig. 1-3. Growth of 1987 year-class Pacific bluefin tuna in captivity. Condition factor is also shown. Arrows indicate spawning.

満5歳以上のGSIの周年変動をみると、雄では2月に1%以下と低く、4月から増加し7月にピークを迎えた後、減少していく傾向が認められた。年間の最大GSIは7歳の7月にサンプリングした3.3%（体重104.7kg、尾叉長171.1cm）であった。この個体は船上に引き揚げた直後に放精するのが認められ、完全な成熟個体であると推察された。雌では、2月から8月にかけてGSI 1%以下の個体が多く、1~2%を示す個体がまばらに出現する程度で、顕著な増加傾向はみられなかった。しかし、7歳の産卵盛期であった7月には最大GSI 4.3%を示す個体を1尾（体重21.3kg、尾叉長113.8cm）のみであるが釣獲することができた。これらのことから、雌雄における成熟のピークは、7月を中心とした時期と推察された。しかしながら、この7月における雌雄のGSI分布は特異的で、雌の成熟個体が著しく少ない傾向にあった。特に、7歳（1994年）の産卵中の7月に11尾をサンプリングしたが、9尾までが雄で、釣獲された1尾の雌もGSIは0.7%と低かった。

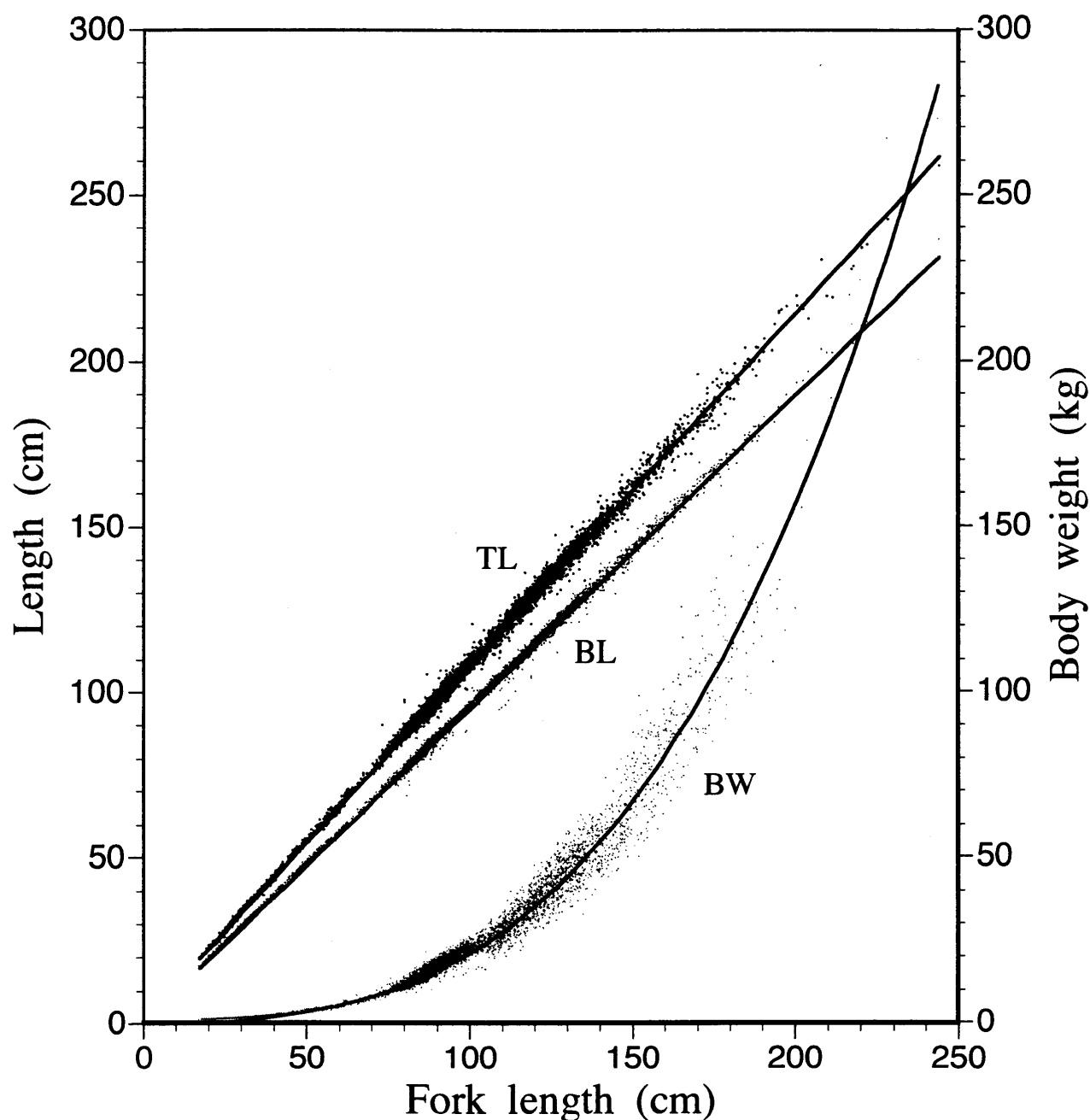


Fig. I -4. Relationship between fork length and body length, total length and body weight of the Pacific bluefin tuna. TL, total length ; BL, body length ; BW, body weight.

(3) 産卵時刻直前の生殖腺の性状

クロマグロ成魚の釣り上げに当たっては、餌を付けた釣り針を生簀中央の表層へ投げ込む方法で行った。7歳時の産卵盛期であった7月にサンプリングしたところ、釣り上げた8尾中7尾が成熟した雄であり、残りの1尾が雌であったものの、GSIは0.7と低い未成熟個体であった。成熟した雌親魚が表層で釣れないことから、沈子と浮子を付け、速やかに水深4m以下に釣り針を沈める方法を試みたところ、釣れたのが前述のGSI最大雌個体であった。この個体は、尾叉長113.8 cm、体重21.3 kgと小型ながら、生殖腺重量914 gで (Fig. I -6-A)、卵巣外部からの観察で透明卵が認められた (Fig. I -6-B)。これを切開したところ、卵巣内には油球1個を有する成

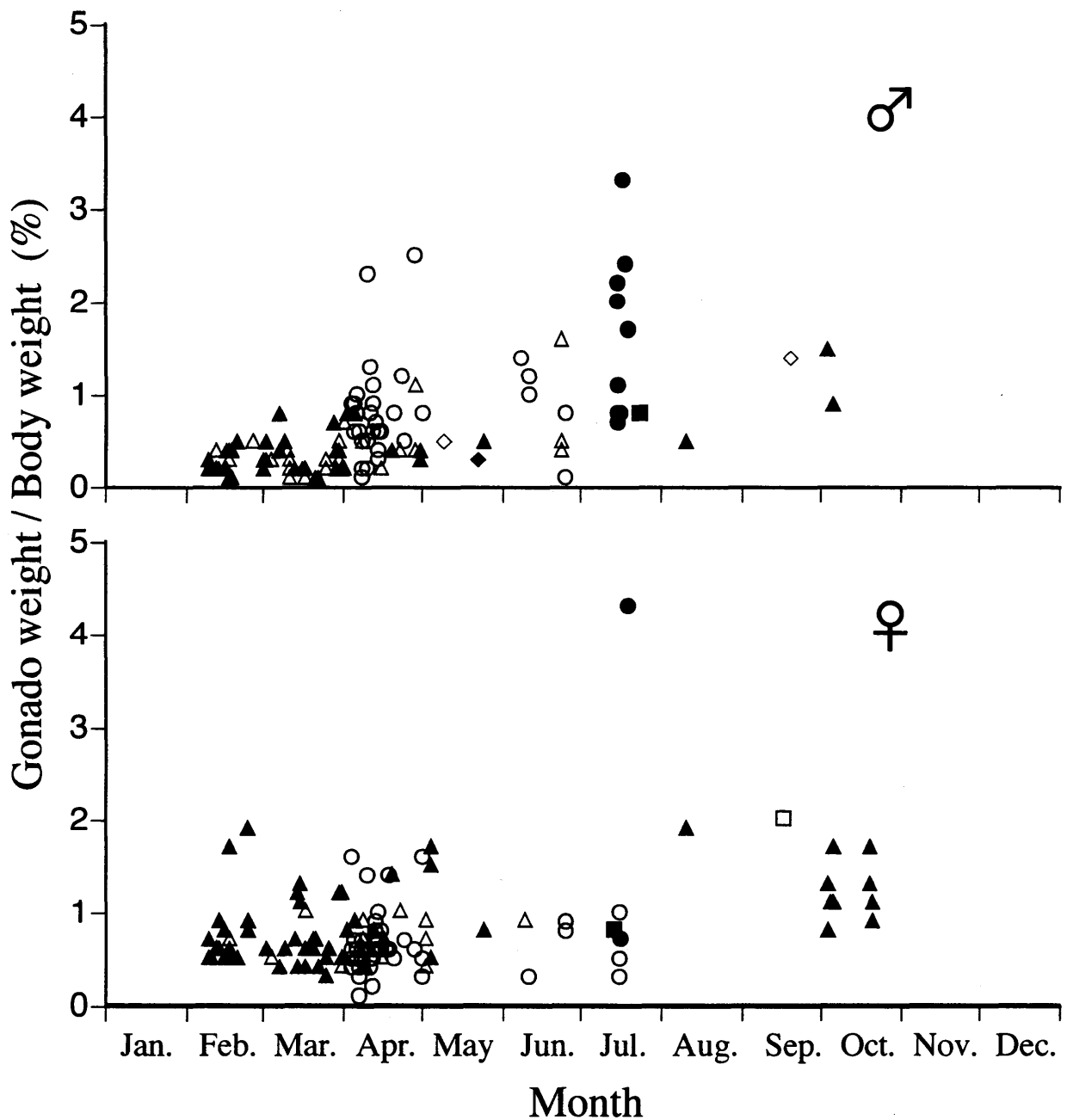


Fig. I-5. Seasonal change of gonado-somatic index of 1987 year-class Pacific bluefin tuna in captivity.
 ○, 5 years old(1992); △, 6 years old(1993); ●, 7 years old(1994); ▲, 8 years old(1995); ■, 9 years old(1996); □, 10 years old(1997); ◆, 11 years old(1998); ◇, 12 years old(1999).

熟卵が認められ、真円形に近いものも存在した (Fig. I-6-C)。この卵巣から作製した組織切片像を観察したところ、染色仁期、周辺仁期、卵黄球期、および成熟期の卵が混在していた (Fig. I-6-D)。そこで、これら卵粒群の卵径を測定し、卵径組成を調べた。その結果、卵径組成は Fig. I-7 に示すように、0.2~0.3 mm が約 25%，0.3~0.4 mm が約 2%，0.4~0.6 mm が約 40%，0.6~0.8 mm が約 6%，そして 0.8~1.0 mm が約 25%であり多峰型を示した。なお、透明な成熟卵の占める割合は、全体の 5.6%であった。

次に、抱卵数を推定したところ 784 万粒となった。また、この抱卵数と透明な成熟卵の全体に占める割合から、1回の産卵数を推定したところ約 44 万粒となった。

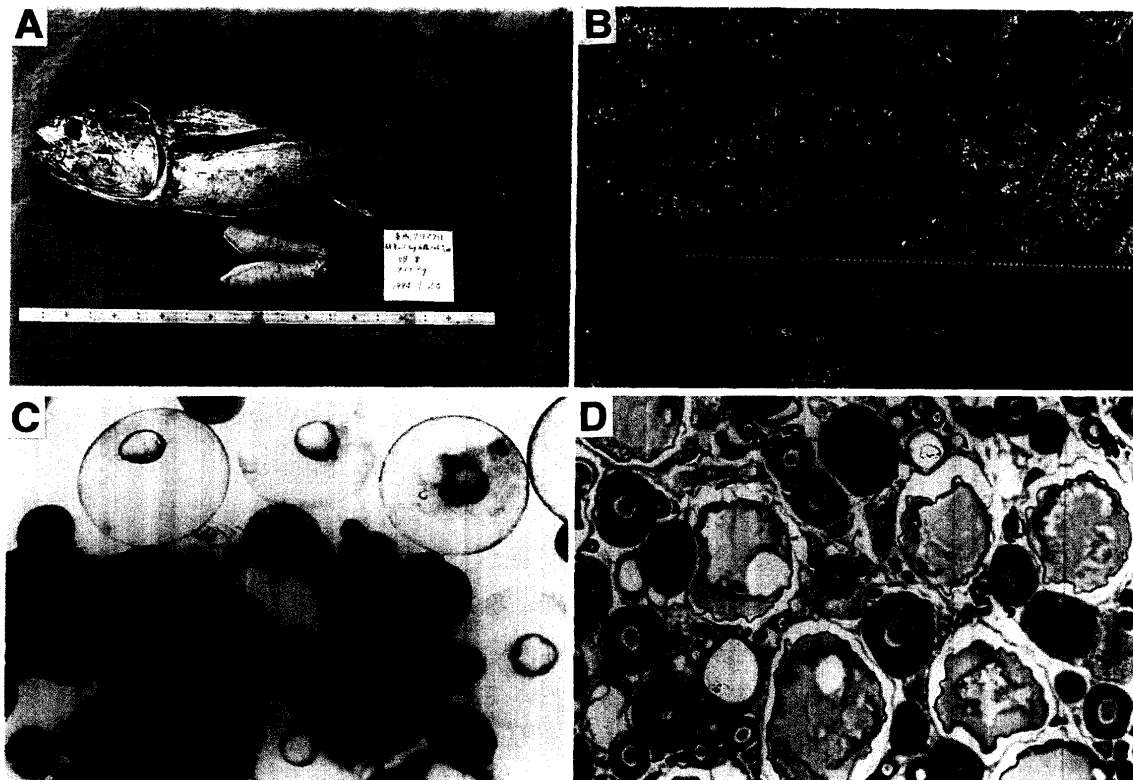


Fig. I - 6. An example of matured 1987 year-class female. A, a female of 21.3kg body weight and its ovaries ; B, eggs in the matured ovary ; C, eggs magnified in the matured ovary ; D, microscopic photograph of transversal sections of matured ovary.

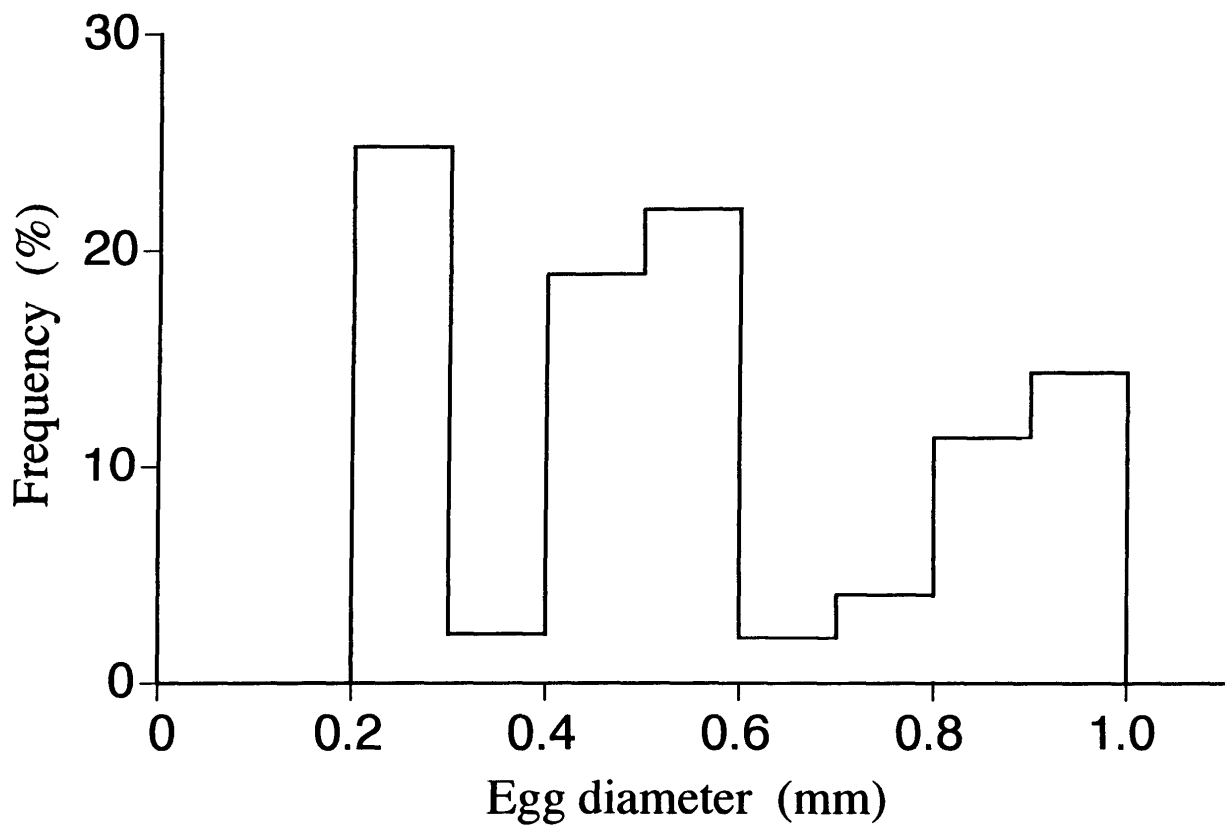


Fig. I - 7. Egg size composition of a matured Pacific bluefin tuna female of 21.3kg body weight.

I-1-3 考察

(1) 親魚の成長および成熟

本研究による養成クロマグロの成長は、南西諸島におけるそれに比べて遅いが⁶³⁻⁶⁵⁾、天然の太平洋クロマグロの推定値⁶⁶⁾に近い成長曲線を示した。最初の産卵は満7歳からであり、同じ串本大島における原田ら⁴⁴⁾の研究で報告された満5歳での産卵は認められなかった。しかし、満5歳となった1992年4月にサンプリングした雌個体(体重46.4 kg, 尾叉長141 cm)の卵巣卵が卵黄球期に達していたことや(GSI 1.6%)、雄個体(体重39.7 kg, 尾叉長136.5 cm)の精巣内に成熟した精子が観察されたことから、水温などの環境条件が整えば、満5年で産卵した可能性がある。従って、5歳未満での成熟については、奄美大島で満4年で産卵したことや⁶⁵⁾、満3年で成熟するらしい⁶⁾との報告もあることから、水温の高い、本種の主産卵海域に近い南西諸島周辺で養成した場合にはその可能性もある。

成熟する魚体の大きさは、大西洋クロマグロでは尾叉長200 cm以上といわれ⁶⁾、太平洋クロマグロでも既往の知見では、中村が、漁獲された雌親魚で放卵する個体を測定したところ、尾叉長220 cm, 体重約187 kgであったことを報告している⁶⁾。また、依田⁵⁸⁾は尾叉長135 cm, 体重50 kg以上で熟卵を持った個体を確認している。本研究で産卵期間中に調査したところ、満7歳の産卵期間中に尾叉長113.8 cm, 体重21.3 kgの個体で熟卵を持っているのを確認した。生簀内の群の平均体重は75 kgと推定されたことから、かなり小型の魚体であり、既往の知見では最小成体と思われるが、5歳以下でこの大きさの個体が成熟する可能性は低いものと考えられる。

(2) 産卵多回性と抱卵数

本研究では、産卵盛期の1994年7月20日午後4時前後にかけて、産卵直前の雌成熟個体(尾叉長113.8 cm, 体重21.3 kg)の卵巣を調査した。その結果、卵径組成は成熟期および前成熟期の卵(卵径0.8~1.0 mm)を約25%含む多峰型を示し、産卵多回性を確認した。マグロ類の産卵多回性については、ミナミマグロ⁶⁷⁾メバチ⁶⁸⁾およびキハダ^{65, 69)}でも認められており、同一個体がほぼ連日産卵することを示唆している。クロマグロについては、中村⁷⁰⁾が多回産卵の可能性は少ないとした。しかし、依田⁵⁸⁾が道西日本海で漁獲された体重50 kg前後の魚体の卵巣内卵径組成を観察した結果をみると、産卵多回性を示唆している。また、上柳⁷¹⁾もそれを認めており、産卵間隔はメバチやキハダより長いと述べ、1産卵期に5回と推算している。

クロマグロでの既往の知見が少ないので、二階堂ら⁶⁸⁾がメバチで観察した結果と比べると、卵巣内卵径組成は成熟期のパターンと良く似ていた。また、依田⁵⁸⁾が調査した熟卵保有個体の卵径組成は、成熟期の卵の割合が本実験結果と比べて著しく少なく、メバチにおける結果⁶⁸⁾から推察すると、産卵後の個体と推察された。

抱卵数については、先述の雌1個体(体重21.3 kg)の卵巣から推定したところ784万粒となり、体重270~300 kgの個体で約100万粒とする中村⁵²⁾の報告とはかなりの隔たりがあるので、今後さらに体重との関係についても調査する必要がある。なお、1産卵期における1尾の産卵数を抱卵数から推定する場合、木川⁷²⁾が述べているように、将来退化する運命にある未熟卵が多数存在している可能性を考慮する必要がある。

卵巣卵から推定した雌1尾1日当たりの産卵数は、産卵盛期における抱卵数と透明な成熟卵の全体に占める割合から、体重21.3 kgの雌で約44万粒と推定したが、イシダイ、*Oplegnathus*

*fasciatus*⁷³⁾ やマダイ, *Pagrus major*⁷⁴⁾ など多くの魚種と同様に、親魚の体重に正比例するものと考えられる。

なお、性比（雄の割合）が48%であったにもかかわらず、産卵直前の釣りによるサンプリングで雄の釣獲率が著しく高かったことから、産卵直前における雌個体の摂餌欲が低いことが推察される。この点については、今後さらに調べる必要がある。

I-2. 自然産卵

I-2-1 材料および方法

生後満4年を経過した1991年以降、産卵期と思われる6月から8月にかけての毎日夕方、午後5時頃から7時30分頃まで追尾行動および産卵行動を観察した。1994年の産卵盛期には生簀網内に潜水し、水中における産卵行動をビデオカメラで撮影した。また、産卵行動が目視できた時は勿論のこと、約10分毎に点検用のタモ網型卵採集ネットを用いて産卵の確認を行った。産卵が確認された場合には、卵採集用ネット2基を用いて、可能な限り産出卵を採集して産卵状況を調べた。この卵採集ネットは、縦0.7、横1.4、深さ2.0 m、および1.3、1.3、2.0 mの角錐型で、生簀の4隅にそれぞれ係留した船と船の間にロープを張り、採集卵がほとんど認められなくなるまで、網生簀内周を曳き続けた。なお、産卵期には産出卵の散逸を最小限に防止するために、生簀内周囲に深さ2.5 mの青色ビニールシートを設置した。

採集した卵は実験室に持ち帰り、まず、浮上卵と沈下卵に分離した後、それぞれを計数し、総採卵数と浮上卵率を求めた。次に、卵の発生段階が2~8細胞期に達する産卵数時間後に、浮上卵群から約50粒を取り出し、投影機を用いて浮上卵に対する発生率を調べこれを受精率とするとともに、卵径および油球径を測定した。また、クロマグロの産卵に影響を及ぼす環境要因と考えられる水温、海水比重、透明度および降雨量を毎日調査し、産卵が認められた年と認められなかった年とのそれらの相違を比較して産卵条件を検討した。

I-2-2. 結果

(1) 産卵期間および採卵数

最初の産卵が認められたのは、満7歳（1994年）で、その後、満8歳（1995年）、満9歳（1996年）および満11歳（1998年）での産卵が認められたが、満10歳（1997年）および満12歳（1999年）での産卵は認められなかった。この間の自然産卵による採卵結果をTable I-2に示した。

1994年の自然産卵は、6月下旬に水温が24℃前後に上昇して約1週間後7月3日から始まり、8月17日までの46日間に、延べ41日にわたり確認した。産卵開始日の採卵数は5万粒であったが、7月8日まで数十万粒で推移した後、7月10日から20日まで毎日100~500万粒を採集した。その後、7月22~23日および25日には産卵が認められず、この前後の採卵数も1~2万粒と極端に少なかった。7月27日から8月11日までは以前と同様の産卵が認められ、8月7日には最多の769万粒を採集した。その後、8月12、13日には再び産卵は中断し、14日から再開したものの、8月17日の11万粒を最後に終了した。この間の水温、海水比重および透明度は、そ

Table I - 2. Spawning of 1987 year class Pacific bluefin tuna

| Years | 1994 | 1995 | 1996 | 1998 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Age of parent fish | 7 | 8 | 9 | 11 |
| Spawning period (date) | 3,Jul.~17,Aug. | 23,Jun.~3,Aug. | 9,Aug.~20,Aug. | 16,Jun.~22,Jul. |
| No. of spawning days/ days of spawning period | 41/46 | 20/42 | 6/12 | 23/37 |
| Time of start of spawning (h:m) | 17:30~18:25 | 17:35~18:30 | 17:00~17:55 | 17:20~18:50 |
| Time required from start of spawning to sunset (h:m) | 0:27~1:49 | 0:31~1:40 | 0:46~1:51 | 0:19~1:53 |
| Range of water temperature during spawning period (°C) | 23.2-29.2 | 21.6-26.4 | 25.8-26.8 | 23.3-26.6 |
| Average of water temperature during spawning period (°C) | 27.0 | 23.6 | 26.5 | 25.1 |
| Range of seawater specific gravity during spawning period (σ_{ts}) | 22.90-25.05 | 23.93-25.78 | 24.74-25.40 | 23.10-25.35 |
| Total egg production ($\times 10^4$) | 8,397.3 | 931.7 | 263.1 | 1,079.6 |
| Total egg production/day ($\times 10^4$) | 204.8 | 46.6 | 43.9 | 46.9 |
| Total buoyant eggs ($\times 10^4$) | 8,193.9 | 912.1 | 252.6 | 1,060.0 |
| Range of buoyancy rate (%) | 91.8-100 | 50.0-100 | 95.6-100 | 94.9-100 |
| Range of fertilization rate (%) | 86.6-100 | 90.8-100 | 95.0-100 | 97.2-100 |
| Largest egg diameter (mm)* | 1.015 \pm 0.033 | 1.017 \pm 0.029 | 0.989 \pm 0.041 | 0.988 \pm 0.025 |
| Smallest egg diameter (mm)* | 0.926 \pm 0.008 | 0.978 \pm 0.015 | 0.968 \pm 0.011 | 0.975 \pm 0.021 |
| Largest oil-globule diameter (mm)* | 0.309 \pm 0.020 | 0.275 \pm 0.019 | 0.269 \pm 0.017 | 0.260 \pm 0.012 |
| Smallest oil-globule dia- meter (mm)* | 0.235 \pm 0.006 | 0.250 \pm 0.004 | 0.243 \pm 0.007 | 0.252 \pm 0.008 |

*Mean \pm SD ($n=30$).

れぞれ、23.2~29.2°C、22.90~25.05 および 4.5~10.5 mの範囲であった。これらの推移は Fig. I - 8 に示す通りである。採集した総卵数は 8,397.3 万粒で、浮上卵率および浮上卵に対する発生率は、いずれもほぼ 90%以上を示し、孵化率もほぼ 80%以上であった。

翌 1995 年の産卵は、前年より早い 6 月 23 日から水温 21.8°C で始まり、6 月末から 7 月初頭にかけて、水温 24°C まで上昇する間、採卵数は 2 万粒から 100 万粒前後にまで増加した。その後、水温が低下し始め、7 月 6 日に水温 21.4°C となって産卵は中断した。水温は 7 月中旬に一時 24°C まで上昇したものの、再び 21°C に急下降するなど安定せず、産卵も認められなかった。その後、水温は 7 月下旬から 24°C 以上で安定し、同月 27 日から産卵が再開され、28 日には最多の 340 万粒を採集したが、以後の水温が安定していたにもかかわらず、急激に採卵数は減少し、産卵は 8

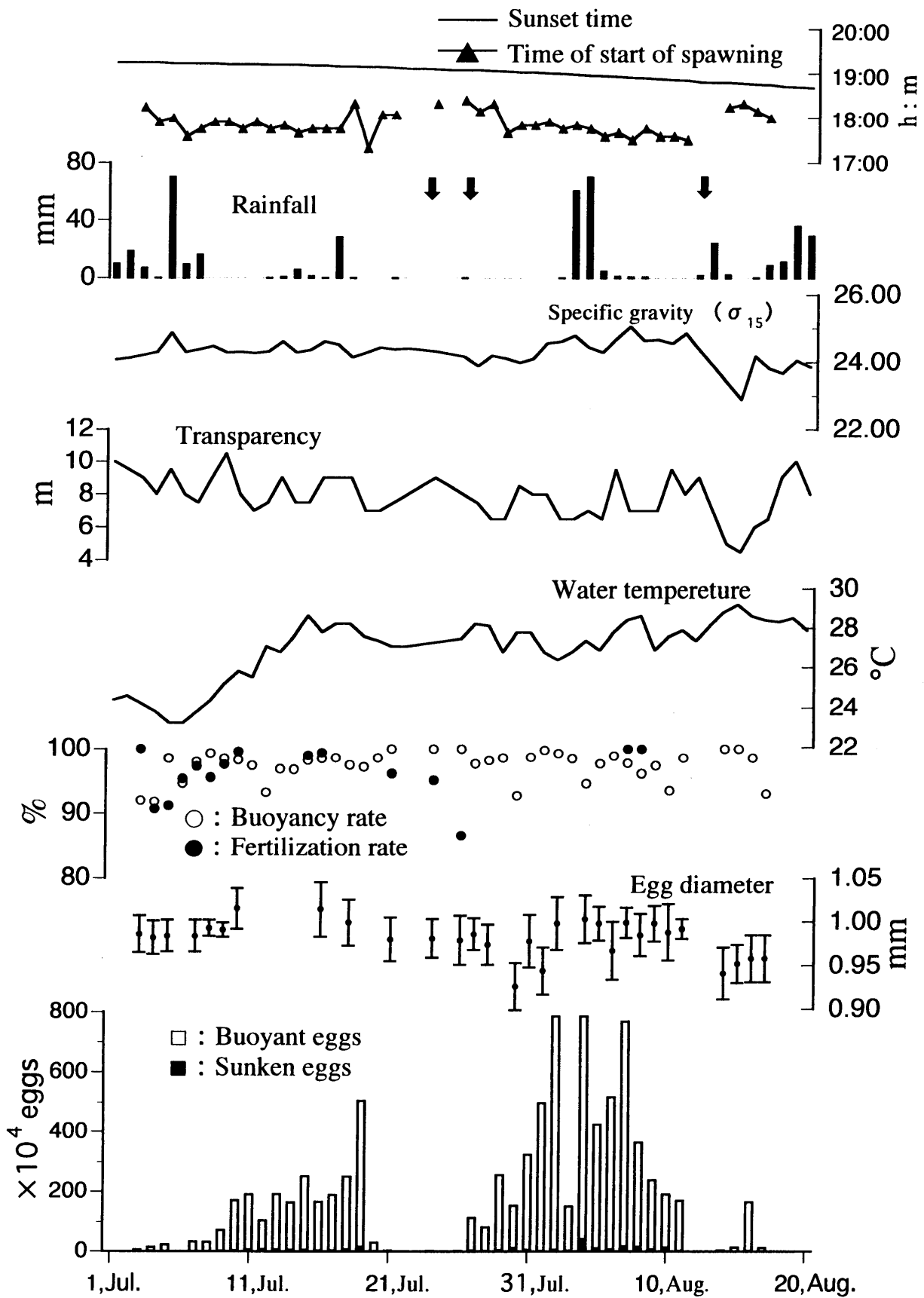


Fig. I-8. Number of the Pacific bluefin tuna eggs collected in the spawning season of 1994. Environmental conditions are also shown. Arrows indicate the approach of typhoon.

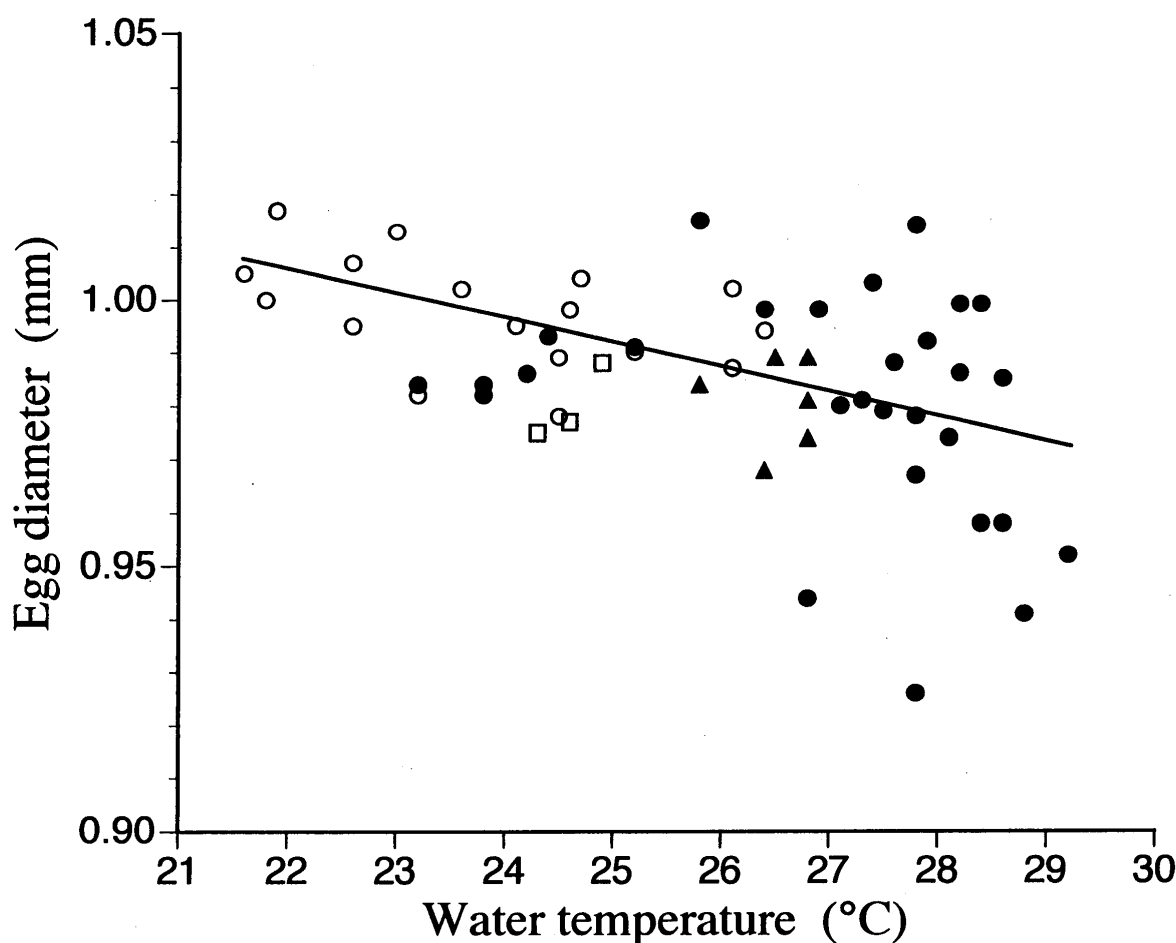


Fig. 1-9. Relationship between spawning temperature and egg diameter of the Pacific bluefin tuna.
●, 1994; ○, 1995; ▲, 1996; □, 1998.

月3日で終了した。この間の水温、海水比重および透明度は、それぞれ、21.6~26.4℃、23.93~25.78 および 4.5~17.0 m の範囲であった。採集した卵の浮上卵率、発生率および孵化率は、前年とおおむね同程度であったが、総卵数は前年の約 1/9 と少なく、931.7 万粒であった。

1996 年の産卵は、6 月下旬の低水温の影響か、それまでで最も遅い 8 月 9 日から始まったが、同月 13 日までの間に、263.1 万粒を採集して終了した。産卵水温の範囲は 26~27℃であった。

親魚の年齢が満 11 歳となった 1998 年の産卵は、5 月下旬からの水温が 22~25℃と例年になく高く、それまでで最も早い 6 月 16 日から始まった。産卵開始 3 日目の 6 月 18 日には、水温 24.6℃で、1 日の採卵数はシーズン最多の 340 万粒を記録した。しかし、その後の産卵は、同月 23 日に水温が 22.6℃に低下して停止した。翌日以後の水温が 24℃台に回復し、同月 28 日から産卵が再開されたものの、1 日の採卵数は 1~65 万粒と不安定であった。この間の水温は 24~26℃と安定していた。7 月中旬以降の水温も 25~26℃と安定していたものの、産卵は間欠的で安定せず、同月 20~21 日の両日にそれぞれ約 90 万粒を採集した後、同月 22 日の 8 万粒を最後に終了した。この間の総採卵数は 1,079.6 万粒で、1994 年の産卵に比べると、日平均採卵数は 1/4 程度であった。なお、浮上卵率および発生率は、いずれもほぼ 90%以上を示した。この間の水温、海水比重および透明度は、それぞれ、23.3~26.6℃、23.10~25.35 および 6.0~13.5 m の範囲であった。

なお、延べ 4 年間の自然産卵で採取した受精卵の卵径および油球径（平均値±標準偏差， n

=30) の各日の平均値は、最大でそれぞれ、 1.015 ± 0.033 mm および 0.309 ± 0.020 mm、最小でそれぞれ、 0.926 ± 0.008 mm、 0.235 ± 0.006 mm であり、水温が高いほど卵径が小さくなる傾向を示した (Fig. I-9)。

以上の延べ4年間にわたる全産卵期中の環境を調べたところ、水温、海水比重および透明度の範囲は、それぞれ $21.6 \sim 29.2^{\circ}\text{C}$ 、 $22.90 \sim 25.78$ 、 $4.5 \sim 17.0$ m であった。

(2) 産卵行動

通常の時期はクロマグロの体色や遊泳行動に雌雄の差は認められなかったが、産卵期に近づくとき雄の体色は黒化し、ブルーの鮮やかな雌と区別できるようになった。また、雄が雌を追尾する行動も観察された。産卵は、早い時では17時30分頃、遅い時では18時30分頃から開始するのを認めたが、これは、日没約1時間50分前から30分前に当たる (Fig. I-8)。産卵行動は、船上から目視できた場合の外、1994年7月30日にビデオカメラで撮影した結果、17時50分に水深5mでの産卵が観察され、本種の産卵は表層よりやや深い所でも行われることが判明した。この時の産卵では、1尾の雌に対して数尾の雄が追尾し、雌が魚体を傾けるようにして反転するのに合わせ、1尾の雄が雌と反対側に魚体を傾け、腹部を接近させるように反転し、同時に雌雄それぞれが放卵・放精するのを確認した。

なお、ネット曳きによって卵の存在を確認できなくなった時点で卵の採集作業を終了したが、この時刻はほぼ日没後1時間以内で、遅くとも19時30分であり、夕闇が迫る頃となった。

I-2-3. 考察

(1) 産卵期および産卵水温

本種の産卵期と産卵水温に関する既往の知見は、いずれも仔魚の分布調査、または漁獲魚の生殖腺調査から推定したものであるが、主要産卵場は南西諸島周辺といわれ⁶⁰⁾、産卵場の南限は台湾の南のバシー海峡付近で、産卵期は5月上旬から7月上旬、その水温は 24°C 以上である^{54, 71)}といわれている。また、これらに続く房総半島沖にかけての本州中部太平洋側における産卵期は6~7月であるという⁶⁰⁾。さらに、北限について、沖山⁵⁷⁾ および西川^{59, 60)} が日本海での仔魚の出現を、依田⁵⁸⁾ が道西日本海での熟卵保有親魚の漁獲をそれぞれ報告しており、秋田県沖までの日本海における産卵期は8月を中心とし、その水温は 25°C 以上と推定している。

本研究の結果から推測する串本町大島における産卵期は、生殖腺熟度指数の最大個体が雌雄とも7月に認められたことや、延べ4年間の自然産卵の結果から、6月中旬から8月中旬の2ヶ月とみることができ、西川⁶⁰⁾ が示す本州中部太平洋側における産卵期と、沖山⁵⁷⁾ および西川^{59, 60)} が報告した日本海での産卵期の間に当たる。

産卵盛期の水温 ($24 \sim 28^{\circ}\text{C}$) は、亜種とされる¹⁰⁾ 大西洋のクロマグロの 20°C 前後^{6, 46)} とはやや異なり、太平洋クロマグロにおける既往の産卵水温に合致したが、産卵開始水温の下限については 21.6°C と低かった。さらに、原田ら⁴⁴⁾ の結果では、盛期の水温も $22 \sim 24^{\circ}\text{C}$ と低い。これは、飼育条件下に特有の現象であるかも知れない。

魚類の産卵サイクルは、年周期的に変動する水温と日長 (光周期) などの外部環境要因に強く依存するものと考えられており、羽生⁷⁵⁾ はその様式を、春・春夏産卵型と秋・秋冬産卵型の二つに分類している。クロマグロは野生種の産卵期および本研究の結果から前者に分類できる。すな

わち、産卵開始および産卵終了要因は、それぞれ、水温の上昇と光周期の長日化、および水温の下降と同短日化と考えられる。本種の主要産卵場である日本南海から台湾東海にかけての黒潮流域および反流域^{56, 60)}では、長日化に伴う産卵水温への上昇が早いものに対して、串本海域では、最長日長となる6月下旬の夏至に至るまで産卵水温への上昇がみられないことも、低水温での産卵開始要因の一つと考えられる。また、産卵終了時期について、順調に産卵した1994年の結果から考えると、8月中旬には、水温が産卵適温範囲にあっても、7月以降の光周期の短日化が進み、日長時間が夏至に比べて約1時間短くなって、産卵時期の限界を迎えるものと推察された (Fig. I-2 および 8)。

産卵水温の上限については、本研究では29.2℃であったが、中村⁵¹⁾は、バシー海峡周辺海域で産卵盛期と考えられる5月下旬に、水温30.5℃下で成熟卵を有する個体が漁獲されたことを報告していることから、30℃前後とみて良さそうである。

従って、養成クロマグロの産卵可能水温は、養成場の環境条件、特に4月から6月にかけての水温変動経緯によっては、21.6℃から29.2℃の範囲にあるものと推定される。ところで、岩井・柏木⁷⁶⁾は50%正常孵化率を示す水温範囲を孵化限界水温と定義しているが、本種の産卵可能水温範囲は、孵化限界水温範囲 (21.2~29.8℃)⁷⁷⁾にほぼ対応した。なお、その温度幅はシマアジ、*Pseudocaranx dentex* (4℃)⁷⁸⁾に比べてかなり広く、約9℃であった。

(2) 産卵開始および終了条件

串本での成熟年齢と想定した満5歳 (1992年) から満12歳 (1999年) までの8年間のうち、産卵が認められたのは延べ4年間で、他の4年間では認められなかった。これら産卵年と非産卵年における諸要因の違いから、串本周辺海域におけるクロマグロの産卵開始条件を検討した。その結果、肥満度については、個体差があるものの年度間に明確な相違は認められなかった。次に環境は、海水比重および透明度について、産卵が認められたそれぞれの範囲、22.90~25.78, 4.5~17.0 m と、非産卵年におけるそれらとの間に相違は見いだせなかった。しかし、水温の変動については、満12歳を迎えた1999年を例外として年度間に相違が認められた。

産卵年と非産卵年における4~8月の水温の変動を Fig. I-10 に示した。本実験における結果からは、産卵開始の水温条件として、5月中旬に21.5℃以上に上昇し、それより低下しない場合、5月に20℃以上の水温を経験した後、6月に21.5℃以上の日が2週間以上連続した場合、および7月中旬から8月にかけて23℃以上を保った場合を挙げることができた。

なお、産卵開始後の採卵数の日変動またはその中断は、天候との関係がいずれの年にも認められず、水温の急激な低下との関係が大きいものと推察された (Fig. I-10)。しかし、1994年の場合には、観察不能の日が無く、水温が26℃以上で比較的安定していたので、他の要因を検討したところ、何れも台風の接近時であった。すなわち、生簀の設置場所は外洋の影響を強く受ける場所であるため、台風接近に伴う波浪によるものと推察された。しかし、波高のデータがないので、これを明らかにするには今後の研究を待たねばならない。

以上のように、産卵の開始あるいは中断は、表面水温と密接に関係しているものと推察されるが、網生簀という閉鎖的な環境との関連も否定できない。山田⁷⁹⁾は、若齢クロマグロの遊泳行動について、水深50 m以上、水温差5℃以上の鉛直移動を時間単位で頻繁に繰り返すことを報告しており、本種の環境変化に対する即応能力が高いことを示唆している。また、矢部・上柳⁵⁴⁾

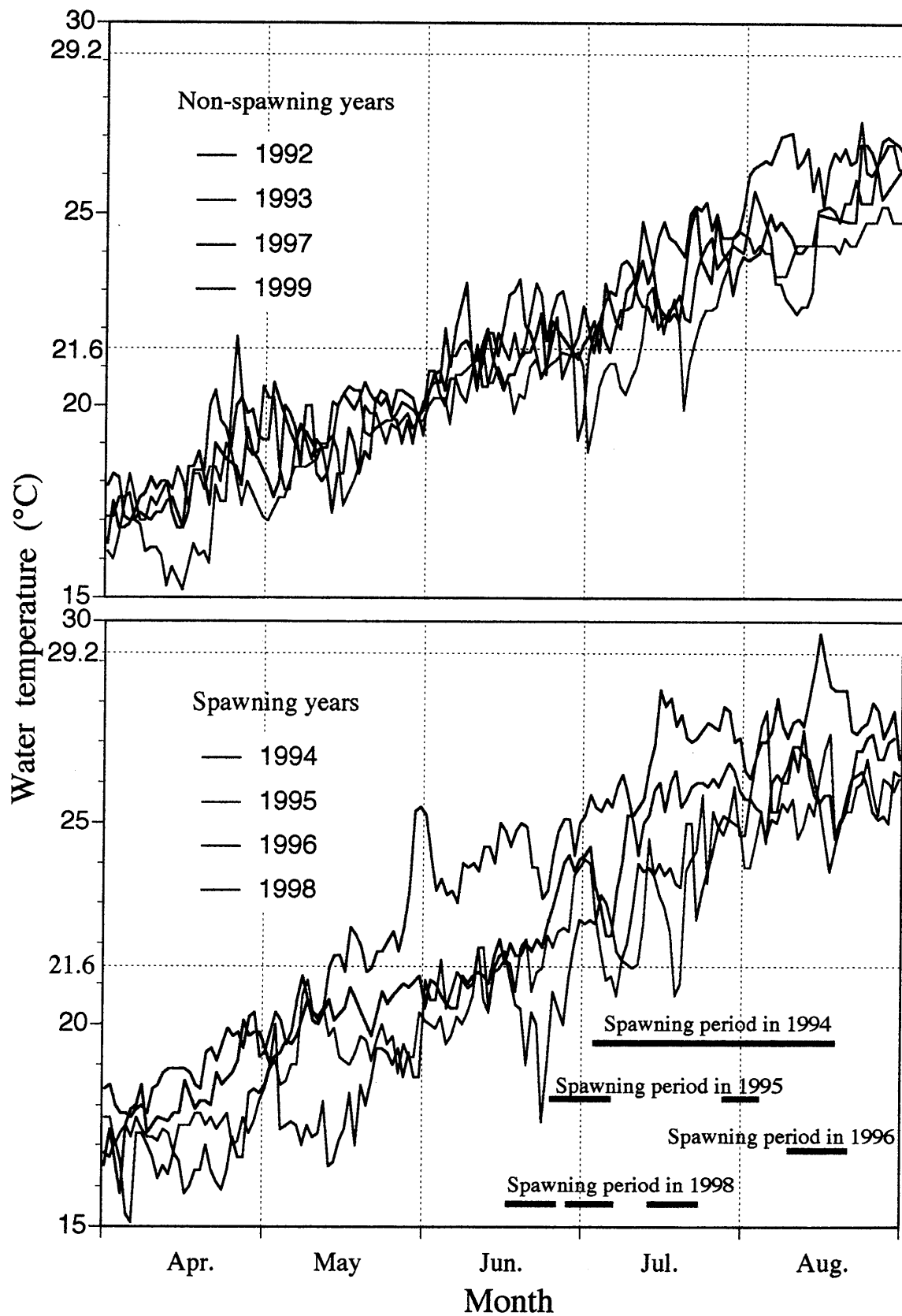


Fig. I -10. Water temperature in spawning years (1994, 1995, 1996 and 1998) and non spawning years (1992, 1993, 1997 and 1999) of the Pacific bluefin tuna. The highest (29.2°C) and the lowest (21.6°C) water temperatures at which bluefin tuna spawned are also shown in the figure.

は、クロマグロ仔魚の出現が水深 50 m 以浅に 25~26°C を中心としたサーモクラインを形成する水域に多いことを示しており、3°C 前後の上下水温刺激でシマアジの産卵を誘発できる事例⁸⁰⁾ などと考え合わせると、激しい水温変動が必ずしも産卵抑制の要因であるとは断定できず、産卵開始時期の正確な予測、および安定した採卵のためにはさらに知見の集積が必要である。

(3) 産卵行動

産卵行動は、基本的にはイシダイ^{73, 81)} などと同様に雌 1 尾に対して数尾の雄が追尾して行われ、クロマグロが水面上に跳ね上がるようにして産卵することは地中海でも知られているが⁶⁾、その報告例は少ない。本研究により、クロマグロの産卵は、水面での産卵行動の他に、水面下 4~5 m でも行われることが確認された。升間⁶⁵⁾ はキハダで同様なことを観察しており、追尾から産卵に至る経緯は、螺旋を描く場合と、直線的な行動による場合とがあるという。この点については、本実験における生簀設置場所の透明度が 10 m 以下 (Fig. I-2) と低いために観察できなかったが、水中でのビデオ撮影による観察で確認した産卵行動は、後者に分類できると思われた。

産卵時刻については、その確認ができた時間帯から推察して、日没を挟んでの約 2 時間前後であり、卵の採集作業の経緯からは、暗くなってからの産卵の可能性は少ないと考えられた。この時間帯は、中村⁵¹⁾ が、漁獲した成熟個体の放卵を確認した時刻の 17 時 35 分と合致する。しかし、地中海でのクロマグロの産卵が午後であるという他に、7~11 時にも観察されていることや⁶⁾、近縁のメバチ⁶⁸⁾ やキハダ^{24, 82)} の産卵が 18 時以後であることなどから、串本周辺環境下特有の産卵時刻である可能性もあり、今後さらに調査する必要がある。

(4) 産卵数

群全体の 1 日当たりの産卵数は、産卵開始時には少なく、経日的に増加した (Fig. I-8) が、雌 1 尾当たりの産卵数の推移も同様の傾向と推察できる。産卵ピーク時の最多産卵数は、升間⁸²⁾ によれば、体重 200 kg で 1,000 万粒、体重 400 kg で 3,000 万粒以上であるという。成熟過程には個体差があるので推定するのは難しいが、これらの数値から近似曲線を求め、本研究における 7 歳時 (1994 年) の雌 1 尾 1 日当たりの最多産卵数を平均魚体重約 75kg から単純に推算すると約 250 万粒となる。ところで、群の中で成熟し産卵に加わる個体の割合はどうであろうか。GSI 調査の結果から、雄のそれは 4 月頃から増加する傾向が認められたが、雌 ($n=130$) では周年 1% 以下の個体が多く、産卵期前後でも 1~2% を示す個体がまばらに出現する程度で、3% 以上の個体は、7 歳の産卵盛期であった 7 月に認めた成熟個体 1 尾 (GSI 4.3%) のみであった。これから推察すると、産卵直前における釣りによる成熟雌個体のサンプリングが困難であったことを考慮しても、産卵個体の割合はかなり少なかったものと考えられる。

7 歳時における雌 1 尾 1 日当たりの最多産卵数が、前述の平均魚体重から推算した 250 万粒前後であるとする、群全体 (281 尾、雌の割合 52%) の 1 日当たり最多産卵数は最多採集卵数約 800 万粒 (Fig. I-7) より多いはずであるので、産卵していた雌個体は 4 尾以上と考えられ、卵の回収率を 1/4 と仮定すると 16 尾となる。イシダイ⁷³⁾ やマダイ⁷⁴⁾ などではほとんどの個体が成熟することや、大西洋クロマグロの産卵状況^{6, 63)} などから推察すると、この割合は低すぎるように思われる。この要因としては、大回遊を行うクロマグロにとって、生簀という限定された環境下でのストレスが大きいこと、あるいは、串本周辺海域の条件がクロマグロの産卵にとって北限

に近いことなどが考えられる。

以上の結果、産卵開始および終了の環境条件、生殖腺の状態や産卵期間、産卵行動についての貴重な知見を得ることが出来た。今後、これを基礎に確実な産卵を目指すためには、巨大で擦れやすく扱いにくいクロマグロではあるが、マダイやヒラメなどで行われている人為的な環境調節による催熟技法の開発が求められよう。そのためには、巨額の施設費を必要とするが、水槽での催熟が必要とされる。その可能性については、東京都葛西臨海水族園の展示水槽内で、1999年にクロマグロの産卵が認められていることから⁸³⁾、かなり高いものと考えられる。

なお、ビンナガ⁸⁴⁾では尾叉長が100 cmより大きくなるに伴って成熟度が低下する傾向にあることが報告されており、マダイ⁸⁵⁻⁸⁷⁾では雌親魚の年齢によって卵質が異なることが示されている。クロマグロにおける親魚の年齢と卵質の関係や、採卵可能な年齢範囲などは不明であるが、種苗生産に用いる親魚の最適な年齢範囲を知ることは重要であり、今後、これらを明らかにする必要がある。

I-3. 精子および卵膜の構造

I-3-1. 材料および方法

精液は、1994年7月18日に調査のために釣り上げた体重104.7 kg、尾叉長171.1 cmの雄親魚から採取した。採取した精液は直ちに海産硬骨魚用塩類溶液で希釈した2%グルタルアルデヒド液で固定した。また、精巣の一部は海産硬骨魚用塩類溶液で希釈した5%ホルマリン液で固定した。固定精液は良く攪拌の後、カバーガラスに塗抹、風乾した。この後、エタノール系の脱水、酢酸イソアミルによる置換、臨界点乾燥後、金スパッタリングを施し、走査型電子顕微鏡(SEM)により精子を観察した。固定精巣は切断した後、水洗、エタノール系の脱水、酢酸イソアミルによる置換、臨界点乾燥を行い、金スパッタリングを施し、精巣内における精子をSEMにより観察した。

卵は1994年7月20日に7歳魚の自然産卵によって得た受精卵である。採取後直ちに、海産硬骨魚用塩類溶液で希釈した5%ホルマリン液で固定した。固定卵のSEMによる観察の前処置は固定精巣の場合と同様である。

I-3-2. 結果

雄親魚は、船上に引き揚げた直後に放精するのを認めた。摘出した精巣重量は3,492 gで、GSIは3.3%であった (Fig. I-11)。

クロマグロの精子は全長約35 μm で、頭部、中片部および1本の尾部から構成されていた (Fig. I-12-A)。頭部は横に膨らんだ球形 (約 $1.4 \times 1.9 \mu\text{m}$)で、後端に湾入部があり、この部分に円柱状の中心子が認められた。頭部終末には1本の尾部の基部を取り囲むように5個に分離した中片部が認められた (Fig. I-12-B)。

卵膜には動物極と思われる位置に、直径約5 μm の卵門が認められた (Fig. I-12-C)。卵門周辺には特別な構造や漏斗状の窪みはほとんどなく、直ちにトンネル部となり囲卵腔に通じていた。トンネル部の内腔面には約8層の層状構造がみられ、螺旋状にたどることができた。卵膜表面全

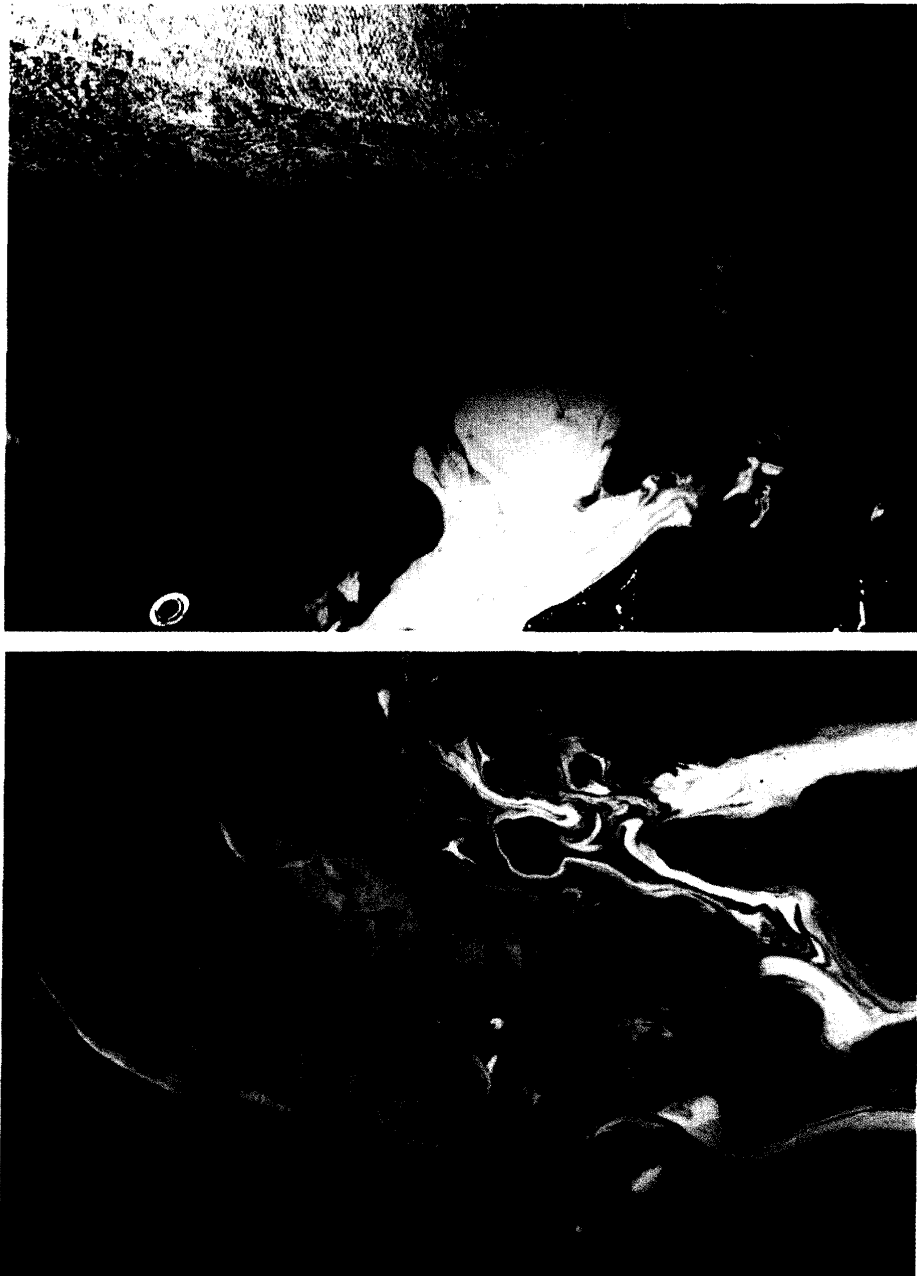


Fig. I -11. Ejuculation of milt (upper figure) and testes (lower figure) of the Pacific bluefin tuna male.

体には多数の pit (小孔) が観察された (Fig. I -12-D)。Pit の径は、約 $0.3\sim0.4\mu\text{m}$ で、卵門周辺においても変動はみられなかった。

I -3-3. 考察

魚類の精子の形態は、Mattei⁸⁸⁾、Jamieson⁸⁹⁾、Hara and Okiyama⁹⁰⁾ らによって多くの分類群について記載されている。通常これらは、頭部 (大部分が凝縮した核)、中片部 (中心子とミトコンドリア) および尾部 (鞭毛で精子の運動装置) の3部から構成され多様性がみられる。クロマグロ精子もこれら3部から構成され、硬骨魚類の一般的な形態を示した。Hara and Okiyama⁹⁰⁾ は、クロマグロと同科 (サバ科) のマサバ、*Scomber japonicus* とゴマサバ、*S. australasicus* につ

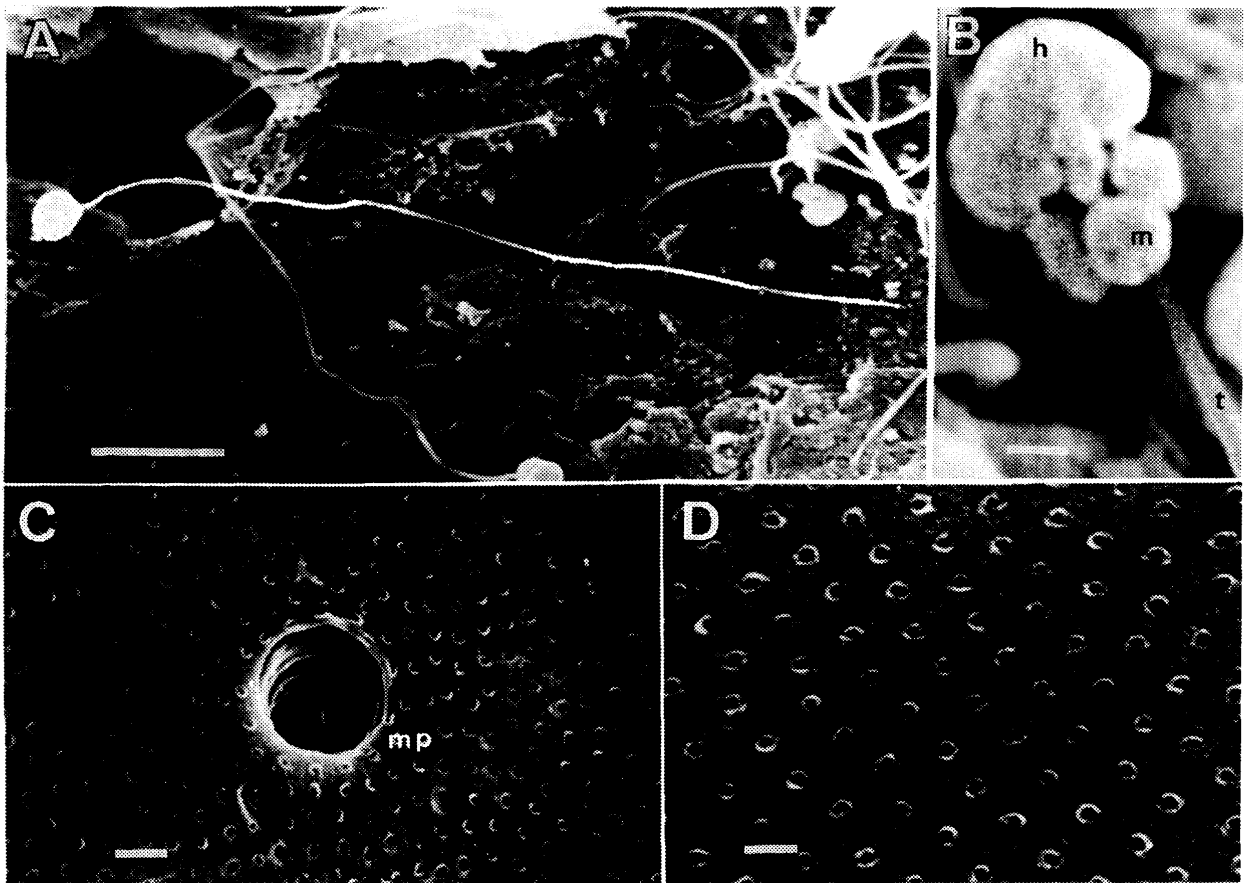


Fig. I-12. Ultrastructure of spermatozoa and chorion of the Pacific bluefin tuna by scanning electron microscope (SEM). A, SEM micrograph of spermatozoa. $5\mu\text{m}$ bar.; B, SEM micrograph of the head region of a spermatozoon. $0.5\mu\text{m}$ bar.; C, SEM micrograph of the micropyle. $2\mu\text{m}$ bar.; D, SEM micrograph of the chorion. $1\mu\text{m}$ bar. h, head.; m, midpiece; mp, micropyle; t, tail.

いて、SEM と TEM（透過型電子顕微鏡）による詳しい観察を行っている。クロマグロ精子の SEM 像は、これら 2 種の SEM 像と同様であるが、全長はこれら 2 種よりやや短いようである。また、頭部の型分けにおいて、この 2 種はスズキ目（perciform type）に属することを明らかにしており、クロマグロ精子の頭部もこの型に属するものと思われる。黒倉⁹¹⁾ は、中片部のミトコンドリアの数と形の特徴から 4 タイプに大別している。クロマグロ精子の中片部には、5 個の中庸のミトコンドリアが認められることから、複ミトコンドリア型に属すると思われる。近縁種のマサバとゴマサバもこの型に属する⁹⁰⁾。なお、この型は海産魚に対応するものである⁹¹⁾。

卵門の形態は魚の種類によって異なるが、典型的なものは開口部がほぼ漏斗状の窪みと、その底から卵膜を貫通して伸びる卵門管からなり、多くの種類では卵門管の口径は精子の頭部の大きさに近い⁹²⁾。クロマグロの卵門は、漏斗状の窪みの部分がほとんどなく、外縁から直接トンネル状に通じている。このような構造は、マダイ、クロダイ、*Acanthopagrus schlegeli*、ヒラメ、*Paralichthys olivaceus*、トラフグ、*Takifugu rubripes*⁹³⁾、シロギス、*Sillago japonica*、ニベ、*Nibea mitsukurii*、ウマズラハギ、*Navodon modestus*、アカシタビラメ、*Cynoglossus joyneri*（久保未発表）などについても観察されており、海産魚に共通する構造であるかも知れない。卵門管の径が約 $5\mu\text{m}$ で、精子の頭部幅が約 $1.9\mu\text{m}$ であることから、卵門管は精子の通路として十分な広さである。卵膜の pit 構造は、クロマグロの他にマダイ、クロダイ、トラフグ、ヒラメ⁹³⁾、サケ、

Oncorhynchus keta, ニジマス, *Oncorhynchus mykiss*, シロギス, ニベ, ウマズラハギ, アカシタビラメ (久保未発表) などについても観察されている。Pit 構造は, 卵膜形成以前の oocyte (卵細胞) に存在した microvilli (微少絨毛) が, 卵膜形成とともに消失した痕跡ではないかと推察されている^{93, 94)}。Pit の分布密度は一定区画内ではほぼ均等と思われるが, 種間および個体間や, 卵 1 個体での位置別分布状態の定量的検討は今後の課題である。

第Ⅱ章 卵発生および孵化

Ⅱ-1. 卵発生および孵化に及ぼす水温の影響⁷⁷⁾

種苗生産に供するための輸送など受精卵を取り扱う上で、卵の発生過程および水温によって異なる発生速度を知ることは不可欠である。クロマグロの卵発生については、原田ら³¹⁾ および木原ら³²⁾ による概要の報告以外に詳細な報告がない。また、正常な仔魚を効率良く孵化させるためには環境管理が重要となる。孵化に影響を及ぼす環境要因としては、水温、塩分濃度、pHなどが考えられるが、一般的に、種苗生産施設の飼育用水で孵化に障害のあるような塩分濃度やpHを認めることは少なく、最も重要なのは水温である。しかし、これらに関する知見は見当たらない。

そこで、本研究では養成親魚の自然産卵によって受精卵を採取し、水温 24℃における孵化までの卵内発生を観察するとともに、発生速度、孵化所要時間および孵化率に及ぼす水温の影響⁹⁵⁾を調べた。

Ⅱ-1-1. 材料および方法

卵内発生の観察および発生速度に及ぼす水温の影響を調べた2つの実験、および孵化所要時間と孵化率に及ぼす水温の影響を調べた実験に供試した採卵用親魚は、それぞれ、第Ⅰ章で述べた7歳魚および1974年に採捕して養成した5歳魚である。採卵時の親魚の収容尾数は、前者が約280尾、後者が約60尾であった。それらの魚体サイズおよび性比については、本種の親魚が大きいことに加えて擦れ易いことから、生かしたまま調べることができない。そこで、魚体サイズについては産卵期の、性比については周年を通しての、それぞれ釣り上げによって随時行ったサンプリングの結果を次に示す。魚体重および尾叉長はそれぞれ、前者、21.3～139.9 kg (平均 81.4 kg) および 106.5～180.9 cm (平均 160.5 cm) ; 後者、73.9～84.9 kg (78.1 kg) および 148.0～159.2 cm (155.0 cm) であった。性比は、前者で雄：雌=1：1、後者で雄：雌=7：3 であった。また、網生簀の大きさと形状は、前者が 30×30×11 m の角型、後者が直径 30 m、深さ 8 m の円形である。餌料は、アジ、サバおよびイカなどを1週間に5日または6日、1日1または2回飽食するまで与えて養成した。供試卵は、これらの親魚から自然産卵によって得た。産卵は日没に近い18時前後から認められた。供試卵は、受精時刻を明確にする必要性から、10分毎にネットを用いて生簀内を点検しながら当日最初の自然産卵を待ち、産卵行動を確認後直ちに卵採集ネットで採集した。従って各実験に供試した卵は、雌1尾から産卵された可能性が高いが、その確認はできなかった。いずれの日も採集した卵の受精率は95%以上であった。

(1) 24℃における卵内発生

実験は、1994年8月16日18時10分に産卵された卵を用いて行った。産卵時の表面海水温は28.7℃であった。採集した受精卵は、直ちに500 ml 容器2個に密封し、予め24℃に調節した水槽内に収容して白浜実験場まで輸送した。この間の卵収容器の水温は採集後50分以内に24℃に達した。輸送時間は約1時間30分で、到着後の卵は、まず卵径および油球径を測定した後、24

℃の恒温槽内に設置した 800ml の濾過海水入り 1,000ml 容ガラス製ビーカーに収容し、無通気で孵化まで観察した。各発生段階の受精後経過時間は、発生速度の個体差を考慮して任意に取り出した 10 粒前後の卵のうち、過半数がその発生段階に到達した時をその発生段階へ 到達したと判断して決定した。

また、孵化仔魚の全長、卵黄長および油球径を目安として、種苗生産における餌付け時期を把握するため、孵化直後から孵化後 5 日目まで無給餌下でそれらを経時的に測定し観察した。

発生過程の観察は、顕微鏡を用いて写真撮影とともにに行い、描画には Taylor の写真応用法⁹⁾を用いた。

(2) 発生速度

この実験に用いた採卵用親魚は卵内発生の観察に用いたものと同じである。実験は、1994 年 7 月 15 日および 17 日にそれぞれ採取した受精卵を用いて 2 回行った。供試卵は、採集後直ちに現場海水とともにポリエチレン袋に入れて、浦神実験場まで約 30 分を要して輸送した。

到着後、あらかじめ 4 個の恒温槽内に設置した 1,000 ml 容のガラス製ビーカーに 800 ml の濾過海水を入れて供試卵約 300 粒を収容した後、恒温槽の温度をそれぞれ、22, 24, 26.5 および 28℃に設定し、無通気で、それぞれの発生段階に達する所要時間を調べた。実験中における各恒温槽の水温変動は±0.2℃以内であった。受精後各発生段階へ到達する所要時間は、24℃における卵発生の観察の場合と同様にして決定した。観察は顕微鏡を用いて行い写真に記録した。

なお、産卵時刻、採集時水温および実験開始時水温は、1 回目ではそれぞれ、7 月 15 日 17 時 50 分、27.4℃および 27.6℃であり、2 回目ではそれぞれ、7 月 17 日 17 時 40 分、28.2℃および 26.4℃であった。

(3) 孵化所要時間と孵化率

実験は、1979 年 6 月 21 日 17 時 10 分、同年 6 月 24 日 17 時 30 分および同年 7 月 3 日 17 時 50 分にそれぞれ採取した受精卵を用いて 3 回行った。

産卵時の水温は、それぞれ、1 回目、22.3℃；2 回目、22.4℃；3 回目、23.2℃であった。受精卵は、採集後直ちに現場海水とともにポリエチレン袋に入れて、白浜実験場まで約 1 時間 30 分を要して輸送した。白浜へ到着後、1,000 ml の濾過海水を入れた 1,500 ml 容のプラスチックボウル内に、それぞれ発生を確認した卵のみ約 50 粒を計数して収容した。その後、それぞれのボウルをあらかじめ所定の水温に設定しておいた恒温槽内へ設置し、異なる水温下における孵化率を調べた。実験に用いた濾過海水の比重 (σ_{15}) は、それぞれ、1 回目、25.00；2 回目、25.30；3 回目、22.90 であった。

なお、実験開始時の産卵後経過時間と発生段階は、それぞれ、1 回目では 15 時間 50 分後の胚体形成期、2 回目では 6 時間 55 分後の桑実期、3 回目では 6 時間 40 分後の桑実期であった。

飼育設定水温は、1 回目では 16℃から 31℃までの 9 段階、2 回目では 17℃から 33℃までの 10 段階、3 回目では 17℃から 29℃までの 6 段階で、実験水槽へ収容後 30 分以内に所定の水温に達した。その後、実験終了までの各区の水温変動は±0.5℃以内であった。各区とも通気は行わず、死卵は適宜に除去した。孵化完了後 1 時間を経過してから全ての孵化仔魚を計数するとともに、脊索が屈曲している個体や短軀個体などの奇形孵化仔魚の出現率を調べた。なお、孵化率と奇形

率は次式によって求めた。

$$\text{孵化率 (\%)} = (\text{全孵化仔魚数} / \text{総卵数}) \times 100$$

$$\text{正常孵化率 (\%)} = (\text{正常孵化仔魚数} / \text{総卵数}) \times 100$$

$$\text{奇形率 (\%)} = (\text{奇形仔魚数} / \text{全孵化仔魚数}) \times 100$$

II-1-2. 結果

(1) 24°Cにおける卵内発生

受精直後の卵は無色透明，球形の分離浮性卵で，1個の透明な油球を有していた。60粒の平均卵径は 0.973 ± 0.025 mm（平均値±標準偏差，最大値 1.033 mm，最小値 0.893 mm）で，平均油球径は 0.250 ± 0.012 mm（最大値 0.275 mm，最小値 0.225 mm）であった。これらの大きさは，産卵4時間後から孵化直前までほとんど変化しなかった。卵黄は無色透明で，囲卵腔は非常に狭

Table II -1. Embryonic development of the Pacific bluefin tuna
(Temp. 23.6-24.2 °C)

| Developmental stage | Time after Fertilization (h:min) |
|---|--|
| 1-cell stage | 0:40 |
| 2-cell stage | 0:45 |
| 4-cell stage | 1:00 |
| 8-cell stage | 1:15 |
| 16-cell stage | 1:30 |
| 32-cell stage | 1:50 |
| Morula stage | 2:30 |
| Blastula | 3:50 |
| Early gastrula | 8:05 |
| Appearance of embryonic shield | 9:40 |
| Formation of optic vesicles | 13:00 |
| Closure of blastopore | 13:20 |
| Appearance of Kupffer's vesicle | 13:40 |
| Formation of lenses | 19:05 |
| Appearance of melanophore | 20:25 |
| Beginning of heart beat and disappearance of Kupffer's vesicle | 22:40 |
| First hatching | 32:00 |
| Hatching completed | 34:30 |

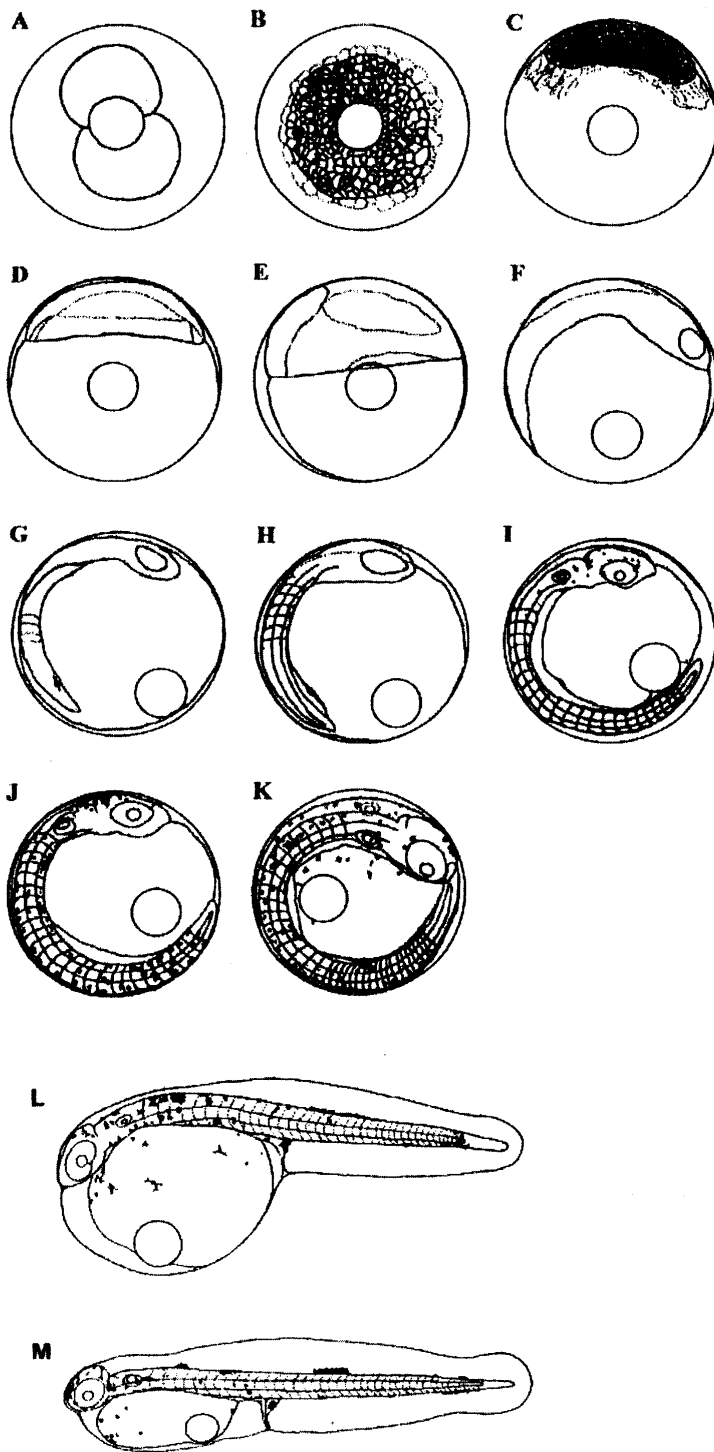


Fig. II-1. Development of eggs and prelarvae of the Pacific bluefin tuna. A, two-cell stage, 45min after spawning; B, morula stage, 2h 30 min; C, blastura stage, 3h 50 min; D, gastrula stage, 8h 05 min; E, appearance of embryonic shield, 9h 40 min; F, closure of blastopore, 13h 20 min; G, appearance of Kupffer's vesicle, 13h 40 min; H, 5 myotomes, 14h 10 min; I, appearance of melanophore, 20h 25 min; J, beginning of heart beat, 22h 40 min; K, 1hour before hatching, 31h; L, newly hatched larva, 32h, total length 2.83 mm; M, 4 hours after hatching, total length 3.22 mm.

く、卵膜には亀裂などではなく無構造であった。

産卵から孵化にいたる卵内発生経過は Table II-1 に示した。産卵 45 分後には 2 細胞期に達し (Fig. II-1-A), 以後 10~15 分毎に分割を繰り返して, 2 時間 30 分後には桑実期に達した (Fig. II-1-B)。3 時間 50 分後, 胞胚期に入った後 (Fig. II-1-C), 7 時間後には胚盤葉が卵径の 1/4 を被包して胚環が形成された。8 時間後, 胚盤葉の卵黄周囲への被包は卵径の 3/10 まで進み, 胚盤葉周辺部に陥入が起こり, 囊胚期に達した (Fig. II-1-D)。9 時間 40 分後, 胚盤葉の被包が卵径の 1/2 に達し, 胚楯が出現した (Fig. II-1-E)。13 時間後, 眼胞が形成され, 13 時間 20 分後, 原口が閉鎖し, 尾端および眼胞が明瞭となった (Fig. II-1-F)。13 時間 40 分後, 3 筋節が認められ, クッパー胞が出現した (Fig. II-1-G)。14 時間 10 分後, 5 筋節となってクッパー胞が次第に大きく明瞭になった (Fig. II-1-H)。17 時間 20 分後, 胚体は卵黄の周囲約 65% に伸張しており, 18 筋節およびレンズの形成が認められた。20 時間 25 分後, 胚体の伸張度は卵黄の約 70% になり, 22 筋節が認められ, 後頭部を中心に小さな黒色素胞が多数発現した (Fig. II-1-I)。22 時間後, 胚体の伸張度は卵黄の約 75% になり, 25~26 筋節が認められ, 黒色素胞は全身に散在するようになった。22 時間 40 分後, 筋節数は 26~27 に増加し, 心臓の拍動を開始する個体や, わずかながらも胚体を動かす個体が認められるようになり, 心拍を開始した個体からはクッパー胞が消失しているのを認めた (Fig. II-1-J)。23 時間 50 分後, 胚体は卵黄周囲の約 85% に伸張し, 動きも活発になった。25 時間後, 黒色素胞は大型化し,

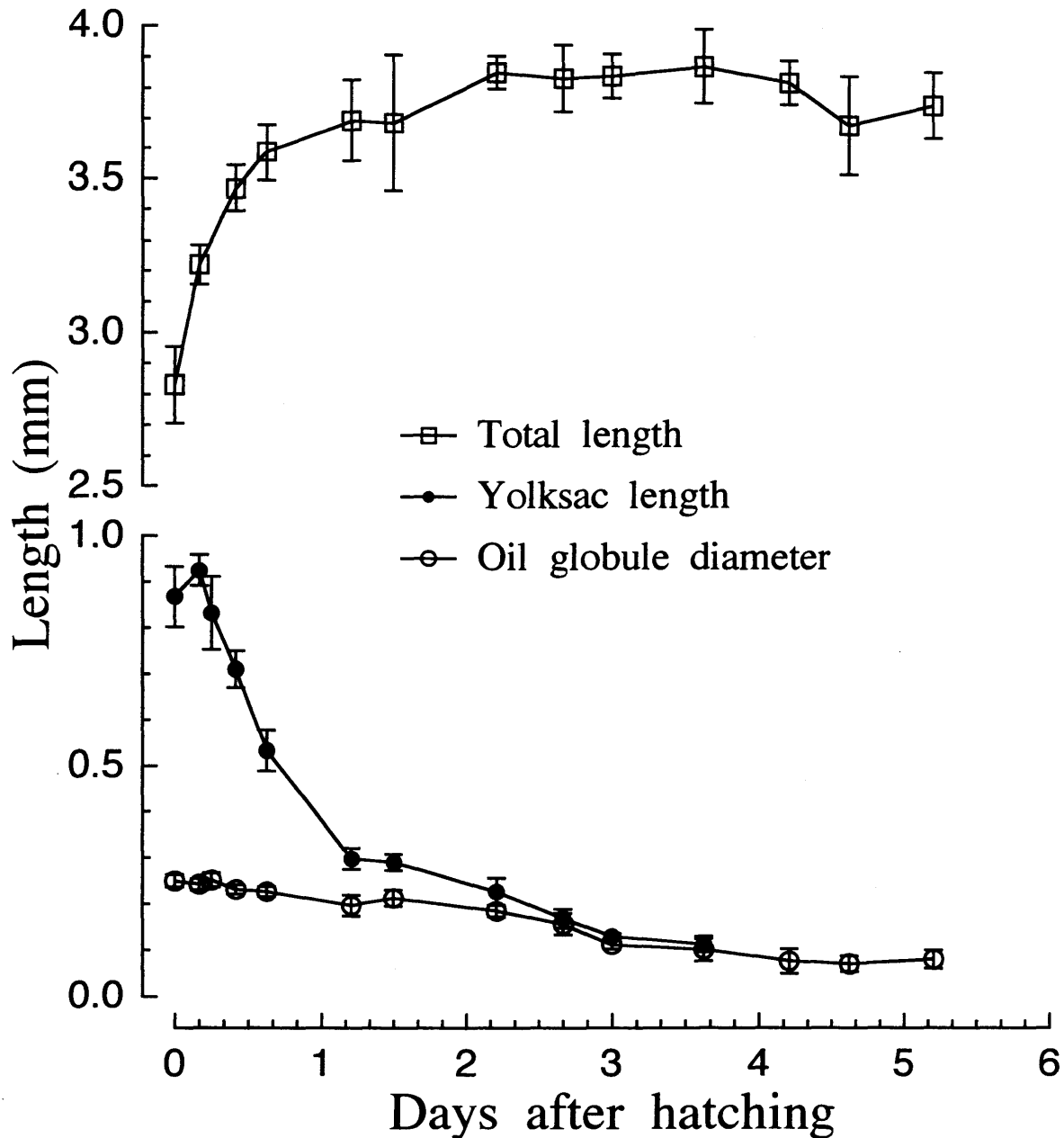


Fig. II-2. Ontogenetic changes in total length, yolk sac length (the major axis) and oil globule diameter. Averaged values were shown for each length ($n=10$). Vertical bars show standard deviations.

胚体に沿った卵黄上にも発現した。30 時間 20 分後、胚体はさらに伸張を続けて卵黄の 95% に達した。卵は沈降し始め、浮上している卵は約半数となった (Fig. II-1-K)。孵化は、胚体が卵黄を一巡した後、32 時間後から始まり、34 時間 30 分後に完了した。

孵化直後の仔魚の大きさは、全長 2.83 ± 0.13 mm (平均 \pm 標準偏差, $n=10$)、卵黄の長径 0.87 ± 0.07 mm、油球径 0.25 ± 0.01 mm であった (Fig. II-1-L)。油球の位置は、孵化直後には卵黄の中央部であったが、孵化 4 時間後には卵黄の縮小にともなって後部に移動した (Fig. II-1-M)。孵化後 24 時間の全長の増加と卵黄および油球の縮小は顕著で、4 時間後には、それぞれ 3.22 ± 0.07 mm, 0.93 ± 0.03 mm, 0.24 ± 0.01 mm となり、孵化 12 時間後には、それぞれ 3.59 ± 0.09 mm, 0.533 ± 0.044 mm, 0.227 ± 0.011 mm に達した (Fig. II-2)。

孵化 2.5 日後で全長は 3.83 ± 0.11 mm となり、眼が黒化して開口した。その後は、全長の増加は止まり、卵黄および油球はさらに小さくなり、それぞれ孵化 3.5 日後および 5 日後でほぼ消失した。さらに卵黄消失後は全長が減少する傾向が観察された。

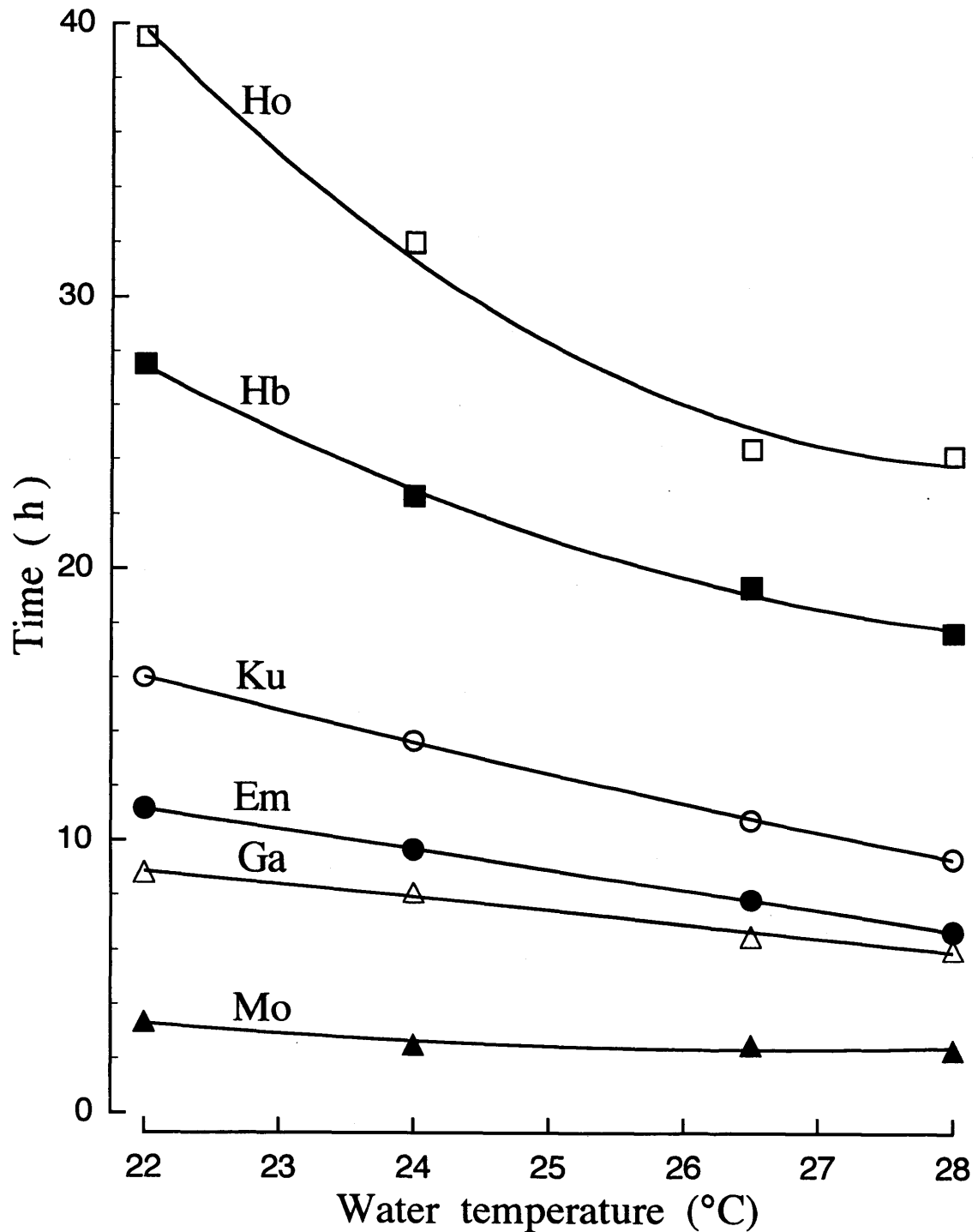


Fig. II-3. Relationship between incubation temperature and embryonic development. Mo, morula stage; Ga, gastrula; Em, appearance of embryonic shield; Ku, appearance of Kupffer's vesicle; Hb, heart beat ; Ho, hatch out.

(2) 発生速度

本実験で調べた 22℃ から 28℃ の水温範囲では、全ての水温区で孵化にまで至った。卵発生における水温と各ステージへの到達時間との関係を Fig. II-3 および Table II-2 に示した。桑実期に至るまでの時間には、各水温でほとんど差が認められなかったが、囊胚期以後の各ステージへの到達時間は水温が高いほど短くなる傾向を示した。また、水温による各ステージへの到達時間の差は、ステージの進行とともに、低水温側で拡大した。

Table II-2. The time lapsed from the spawning to final stage of egg development under different incubation temperatures in the Pacific bluefin tuna eggs. The relationship between the time and incubation temperature is indicated by the equation

| Developmental stage | Time after spawning (h:min) | | | | Equation between time and incubation temperature $T=a+b\theta+c\theta^2+d\theta^3$ (T =time:hr., θ =incubation temperature:℃) |
|---------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|---|
| | 22℃ | 24℃ | 26.5℃ | 28℃ | |
| Morula stage | 3:20 | 2:30 | 2:30 | 2:20 | $T=342.29-39.759\theta+1.5489\theta^2-0.0201\theta^3$ ($r=1.00$) |
| Gastrula stage | 8:50 | 8:05 | 6:30 | 6:00 | $T=320.38+40.621\theta-1.6494\theta^2+0.022\theta^3$ ($r=1.00$) |
| Appearance of embryonic shield | 11:10 | 9:40 | 7:50 | 6:40 | $T=26.06-0.623\theta-0.0025\theta^2$ ($r=1.00$) |
| Closure of blastopore | 15:20 | 13:00 | 9:40 | 9:10 | $T=-652.27+84.633\theta-3.5261\theta^2+0.0481\theta^3$ ($r=1.00$) |
| Appearance of Kupffer's vesicle | 16:00 | 13:40 | 10:45 | 9:20 | $T=54.74-2.2617\theta+0.0228\theta^2$ ($r=1.00$) |
| Beginning of heart beat | 27:30 | 22:40 | 19:20 | 17:00 | $T=901.26-100.05\theta+3.8319\theta^2-0.0495\theta^3$ ($r=1.00$) |
| First hatching | 39:30 | 32:00 | 24:25 | 24:10 | $T=-1097+151.62\theta-6.5919\theta^2+0.0931\theta^3$ ($r=1.00$) |

(3) 孵化所要時間と孵化率

孵化所要時間と水温の関係については、胚体形成期から開始した実験結果は不必要なので、桑実期から開始した 2 回目と 3 回目の実験結果のみについて述べる。

これら各区の平均水温と孵化開始までの所要時間の関係を Fig. II-4 に示した。高温側では 33.4℃ でも孵化が認められたが、低温側で 18.9℃ 以下の実験区での孵化は全く認められなかった。孵化が認められた実験区における産卵から孵化開始までの所要時間は、19.9～20.0℃ で 41 時間 10 分～44 時間 40 分、23.7～24.4℃ で 29 時間 40 分～32 時間、28.0～28.8℃ で 23 時間 50 分～24 時間 10 分と高水温区ほど短かった。これら水温と孵化開始までの所要時間の関係は次式のような回帰曲線で表すことができた。

$$T=0.121\theta^2-8.06\theta+155$$

$$(r=0.983)$$

T : 孵化開始までの所要時間 (h), θ : 平均水温 (℃)

また、孵化所要時間の対数を水温に対してプロットし、19.9～24.4℃ および 26.2～33.4℃ の間で最小二乗法による回帰式を求めたところ、それぞれ -2.81 および -0.86 の傾きを持つ 2 つの直線が得られた。これを、回帰係数の差の検定⁷⁾により 25℃ 付近にある変曲点で有意差を検討したところ、危険率 1% 以内で有意な差が認められた。

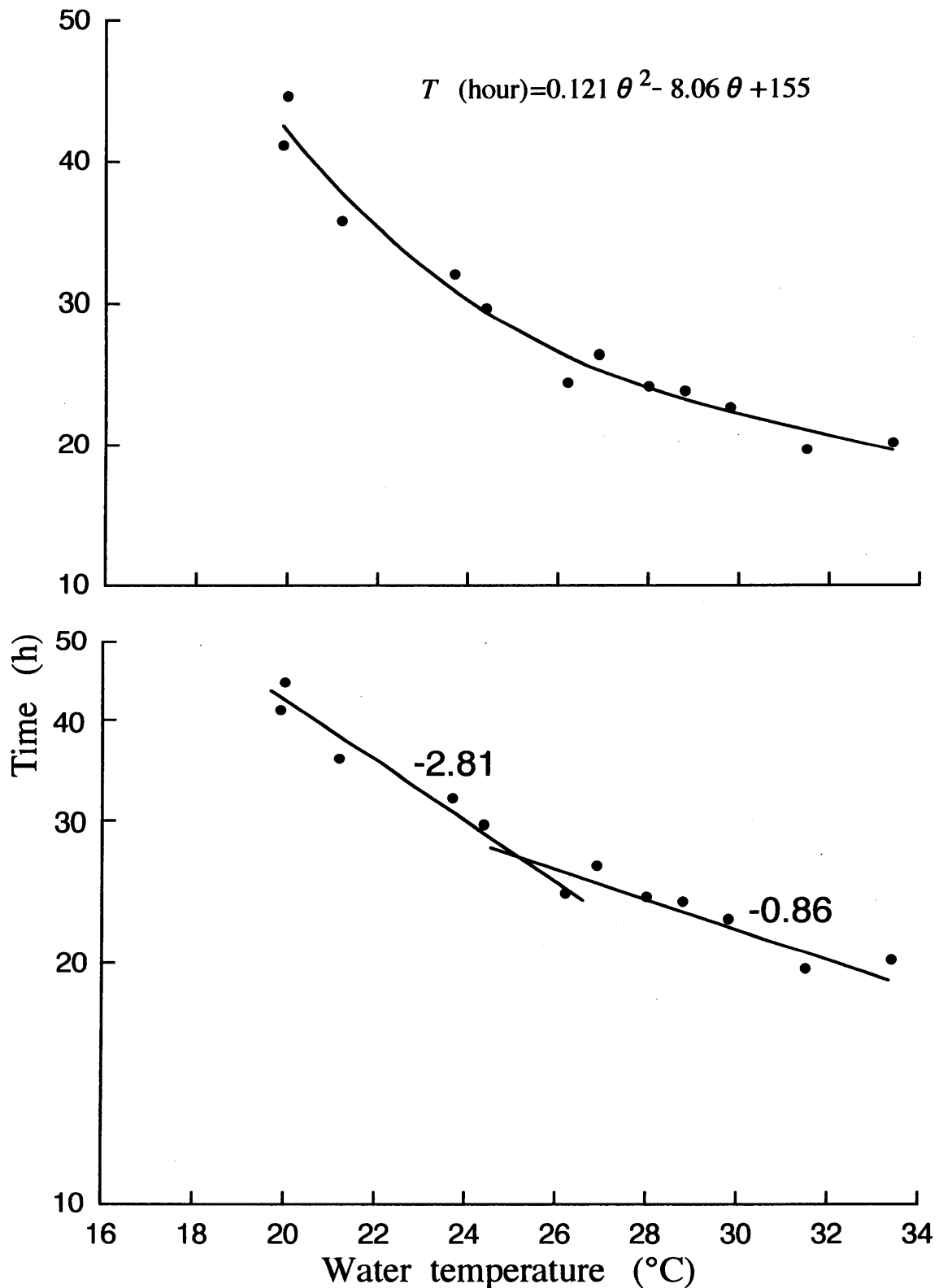


Fig. II-4. Relationship between incubation temperature and time required for from spawning to hatching. The lines indicate the regression lines. Each straight lines are significantly different in their slopes ($p < 0.01$). Figures by the regression lines denote the slope of the lines.

次に、孵化の状態と水温の関係について述べる。各水温下における孵化率、正常孵化率および奇形率をそれぞれ、Fig. II-5, Fig. II-6, Fig. II-7に示した。孵化が認められた水温範囲は、桑実期から実験を開始した場合、19.9°C以上であり、胚体形成期から実験を開始した場合、17.7

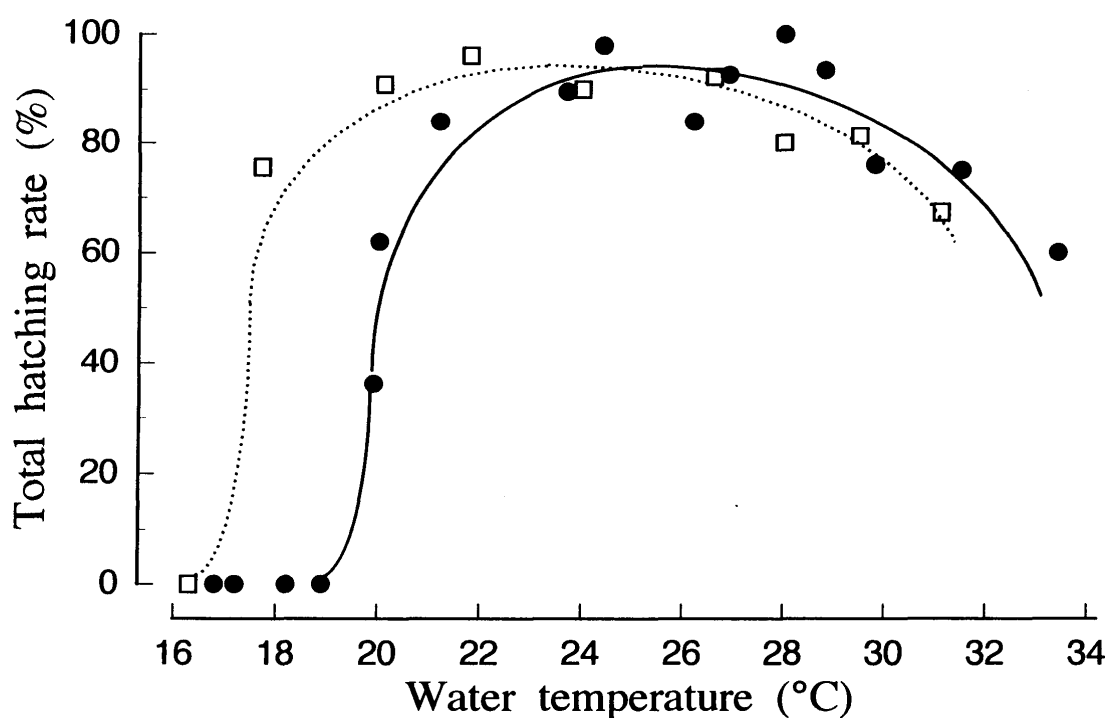


Fig. II-5. Total hatching rate of the Pacific bluefin tuna eggs incubated under different water temperatures. Circles and squares indicate the results of the experiments started from morula stage and from embryogenesis stage, respectively. Solid line and dashed line show the results from morula stage and from embryogenesis stage, respectively.

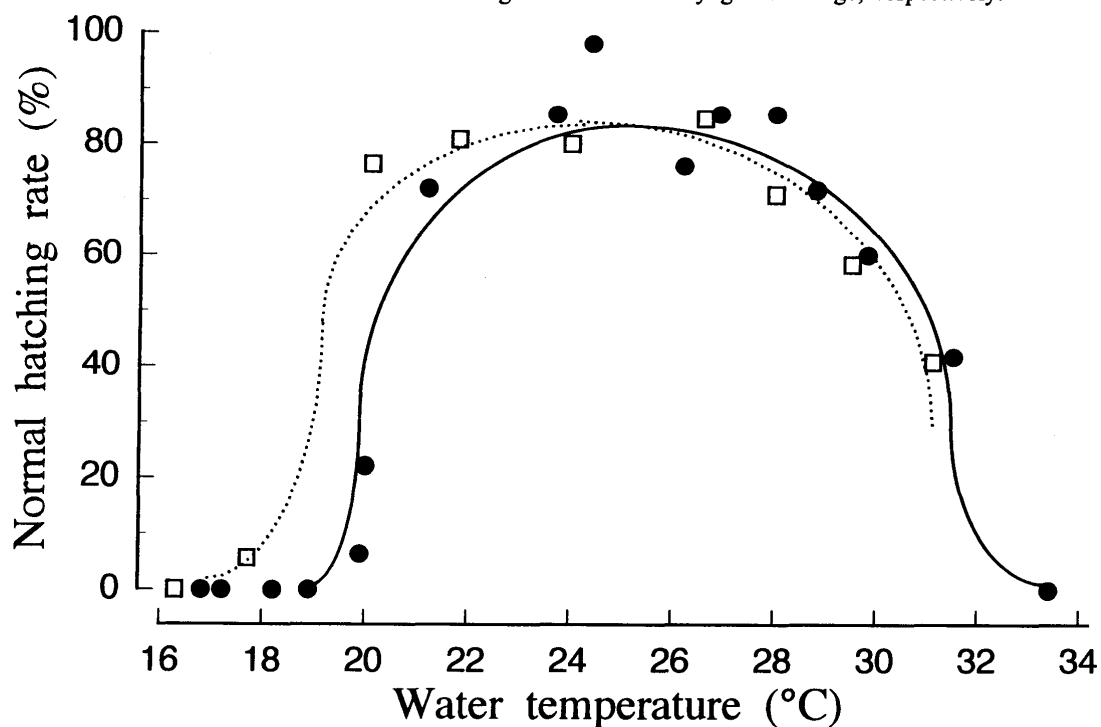


Fig. II-6. Viable hatching rate of the Pacific bluefin tuna eggs incubated under different water temperatures. Circles and squares indicate the results of the experiments started from morula stage and from embryogenesis stage, respectively.

℃以上であった。このうち、正常孵化仔魚が得られた水温範囲は、桑実期から実験を開始した場合、19.9 から 31.5℃の間、胚体形成期から実験を開始した場合、17.7℃以上であった。桑実期から実験を開始した場合に 50%以上の正常孵化率を示した水温範囲は 21.2 から 29.8℃の間であり、

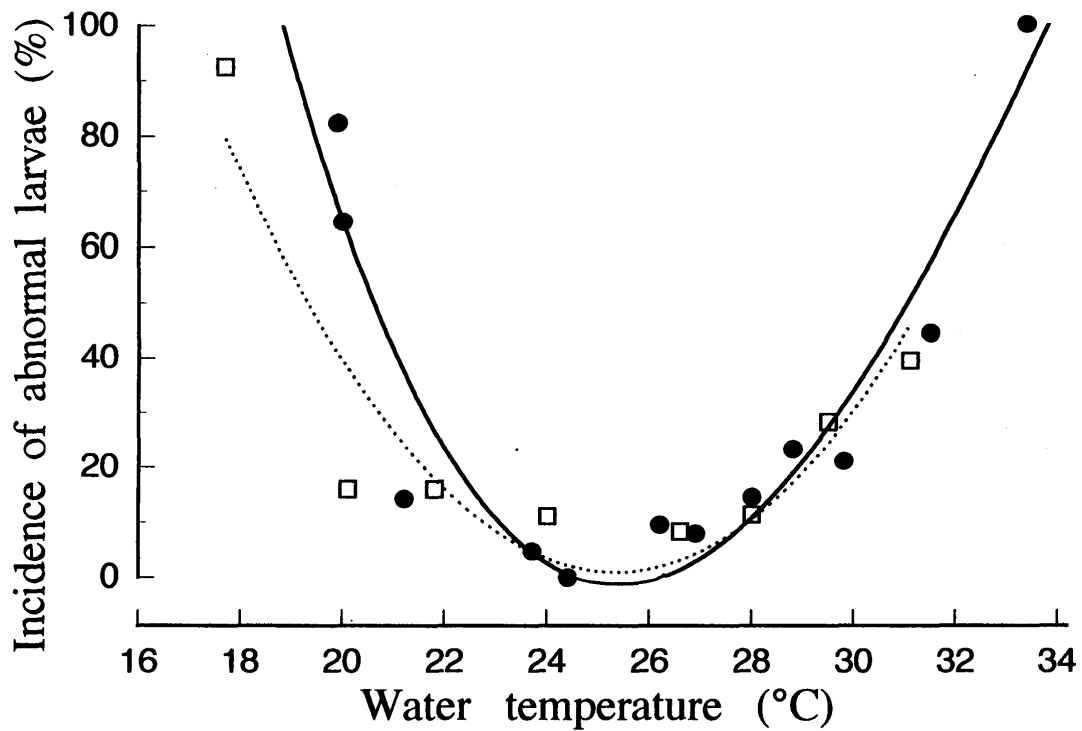


Fig. II-7. Incidence of abnormal larvae of the Pacific bluefin tuna incubated under different water temperatures. Circles and squares indicate the results from morula stage and from embryogenesis stage, respectively.

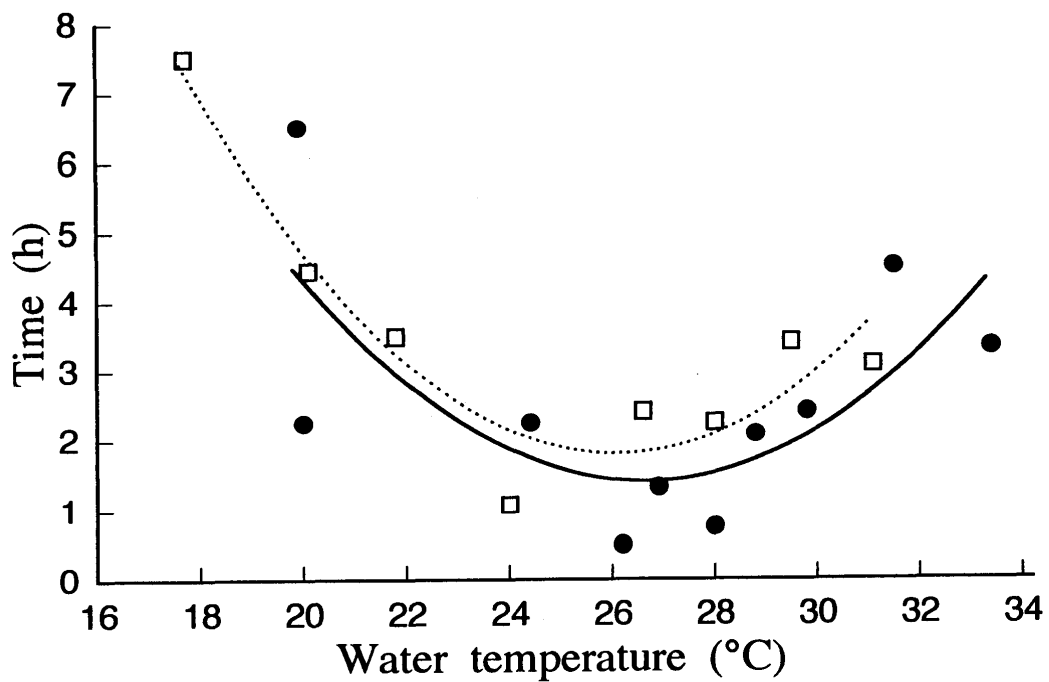


Fig. II-8. Relationship between water temperature and time required from the beginning to the end of hatching. Circles and squares indicate the results of the experiments started from morula stage and from embryogenesis stage, respectively.

最も正常孵化率が高く、奇形率が低かった水温は25℃前後であった。

また、水温と孵化開始から孵化完了までの所要時間との関係を調べた結果を Fig. II-8 に示した。水温24～29℃の間では30分から2時間30分の範囲であったが、この範囲より低くなるほ

ど、また、高くなるほどその時間は長くなる傾向が認められた。特にその傾向は低温側で顕著で、17.7℃では7時間30分を要した。

II-1-3. 考察

(1) 卵内発生

本研究で得られたクロマグロの卵径と油球径は、Padoa⁹⁸⁾の地中海におけるクロマグロの、それぞれ1.00～1.12 mm および0.25～0.28 mm より小さかった。太平洋と大西洋のクロマグロについては亜種であると主張されており^{1, 9, 10)}、別種¹¹⁾とすることも提唱されている。地中海のクロマグロ卵と本研究で得られたクロマグロ卵の卵径が異なったのは、亜種または種レベルでの違いによる可能性もある。

しかし、原田ら²⁹⁾が報告した、クロマグロ親魚から得た産卵水温21.8～25.6℃での卵径1 mm内外に比べてもやや小さかった。一般に、同一種の卵径の変動については、低水温時に産む卵では高水温時に比べて卵径が大きくなる傾向が知られており、川崎⁹⁹⁾は大西洋サバ、*Scomber scombrus*の例を挙げている。また、マダイについても同一親魚を用いて得た同様な報告がある^{100, 101)}。クロマグロについても第I章で述べたように、水温が高くなるに従って卵径が小さくなる傾向を示した。本実験で用いた卵が原田らの報告したものと比べてやや小さかったのは、産卵水温が28.7℃と高かったことによるものと推察される。

卵内発生の各段階は一般硬骨魚と大差なく、卵膜に亀裂がないことや、囲卵腔および油球などからみた卵の形状は、増殖上重要といわれている魚種の中ではサバ科魚類のほか、タイ科魚類やハタ科魚類などと同様であった¹⁰²⁾。

孵化直前の本種の胚体は、ブリ、*Seriola quinqueradiata*¹⁰³⁾やカンパチ、*Seriola dumerili*^{104, 105)}が卵黄を3/4周して孵化するのに対して、カツオ、*Katsuwonus pelamis*¹⁰⁶⁾、マサバ¹⁰⁷⁾、シマアジ¹⁰⁸⁾、ヒラマサ、*Seriola aureovittata*¹⁰⁹⁾などと同様に卵黄を1周した。

また、キハダ^{24, 25)}、メバチ¹¹⁰⁾、カツオ¹⁰⁶⁾、マサバ¹⁰⁷⁾などのサバ科魚類や、ブリ¹⁰³⁾、カンパチ¹⁰⁴⁾、シマアジ¹⁰⁸⁾などのアジ科魚類にみられる、孵化直前における卵の沈降現象は本種でも観察されたが、これは水温28℃以上では観察されなかった。魚卵の孵化前の沈降については田中¹¹¹⁾も述べているが、クロマグロ卵が28℃以上では沈降しなかったことについて明確な原因は分からない。しかし、クロマグロ卵の正常孵化率は28℃以上の温度で顕著に低下したことから (Fig. II-6)、28℃以上の水温では正常な発生が阻害されたことが考えられる。

孵化仔魚の油球の位置については、孵化直後は卵黄の中央部であることを認めたが、水戸¹¹²⁾は卵黄の後部としている。これは、経時観察による本研究の結果を付き合わせてみると、孵化後数時間を経過した仔魚であり、成長過程における違いと考えられる。

(2) 発生速度

各水温下で桑実期に至るまでの時間にはほとんど差が認められなかったこと、囊胚期以後の各ステージへの到達時間は水温が高いほど短くなる傾向を示し、その時間差はクッパー胞出現期以降ではさらに増大したことなど、クロマグロ卵の発生速度と水温の関係は、ヒラメ¹¹³⁾、シマアジ¹¹⁴⁾、キジハタ、*Epinephelus akaara*¹¹⁵⁾の場合と同様の傾向を示した。これは、多くの魚種の卵発生過程で知られており、一般的な現象と考えられる¹¹⁶⁾。

また、孵化を含む各発生段階への到達時間は、水温が高くなるほど短くなるが、水温 25℃付近に変曲点があり、それ以上での時間差は小さく、以下では低くなるほど大きくなる (Fig. II-3 および 4)。このような現象は他の魚種でも知られており、変曲点の前後で卵内の酵素あるいは触媒反応系に質的变化が生じるためと考えられている¹¹⁶⁾。

(3) 孵化所要時間

クロマグロ卵の受精から孵化を開始するまでに要する時間は、同じ水温域で比較すると、ブリ属^{103-105, 109)}より短く、キハダ^{24, 25)}、メバチ¹¹⁰⁾、カツオ¹⁰⁶⁾、マサバ¹⁰⁷⁾などのサバ科魚類やシマアジ^{108, 114)}、ハタ類¹¹⁵⁻¹¹⁹⁾などに近かった。一般に、魚卵の孵化速度は小型の海産浮性卵で速いといわれ¹¹⁶⁾、卵径 1 mm 内外の本種の孵化速度は、卵径 1 mm 以上のブリ属より速く、小型卵として代表的なキジハタと比べてもほとんど差はなかった。ブリ属中最も卵径の大きいヒラマサ (1.27~1.50 mm) では水温 20.0~21.4℃の条件下で 76 時間を要する¹⁰⁹⁾のに対して、同様の水温域での本種の孵化所要時間は 40 時間前後と短かった。

(4) 孵化率と水温

孵化率と水温との関係は、桑実期から開始した実験では 26℃付近、胚体形成期から開始した実験では 23℃付近をそれぞれ最大値とする曲線で表すことができた。正常孵化率と水温との関係における最大値は、それぞれ前者では 25℃付近、後者では 24℃付近にあり、奇形率の最小値はいずれの場合も 25℃付近に認められた。以上の結果から、クロマグロの孵化最適水温は 25℃付近にあるものと考えられた。

このように、本研究における結果では、孵化所要時間と水温との関係における変曲点 (25℃付近) が孵化最適水温域に対応した。このような現象はキジハタ¹¹⁵⁾でも認められているが、ヒラメ¹¹³⁾では認められていない。

なお、卵割開始期から原口閉鎖期までの卵は振動など機械的衝撃に著しく弱いことが知られている⁷⁶⁾。水温に関しても、シロギス卵による実験から、Oozeki and Hirano¹²⁰⁾は眼胞形成期までは高温側への温度変化に対する耐性が低いことを、柏木ら¹²¹⁾は、異なる水温で、発生段階別に開始する実験で比較したところ、発生初期ほど高水温に対する耐性が低いことを、それぞれ報告している。また、このような事例はマダイ¹²²⁾などについても知られており、本研究における実験結果でも、胚体形成期から開始した実験では、桑実期からの実験結果に比べて、高温側ではそれほど差はなかったが、低温側では 1~2℃低い水温に耐性を持つ傾向が認められ、発育初期にはより強く水温の影響を受けるものと推察された。

また、岩井・柏木⁷⁶⁾は 50%正常孵化率を示す水温範囲を孵化限界水温と定義し、12 魚種についてそれを示している。このうち、最も上下の孵化限界水温の幅が広いのは、アユ、*Plecoglossus altivelis* の 9.9~27.9℃ (温度幅 18.0℃)、最も狭いのはムシガレイ属の *Eopsetta jordani* の 5.8~8.0℃ (温度幅 2.2℃) である。クロマグロにおける上下の孵化限界水温幅は、シマアジの 20~24℃ (温度幅 4℃)¹¹⁴⁾より広く、マダイの 14~31℃ (温度幅 17℃)より狭い 21.2~29.8℃ (温度幅 8.6℃)で、マアジ、*Trachurus japonicus* の 16~25℃ (温度幅 9℃)、ヒラメの 11.2~20.6℃ (温度幅 9.4℃) などと同様に中間的な値を示した。

なお、孵化最適水温はおおむね産卵 (受精) 水温と一致し、シロギスでは孵化最適水温と孵化

限界水温が産卵水温に依存して変化するといわれている⁷⁶⁾。クロマグロにもこれが当てはまるとすると、本研究における産卵水温が22.3～23.2℃であったことから、これより高い水温で産卵した場合の孵化最適水温は25℃より高くなり、孵化限界水温の範囲も21.2～29.8℃より高温側に移動する可能性がある。

(5) 摂餌開始時期

孵化仔魚は外部栄養を摂取するまでは、卵黄の栄養を吸収して成長するが、イシダイでは孵化後4時間の全長の伸びがほとんどみられない⁸¹⁾のに対して、本種では孵化直後から急激な伸びを示すことが観察された。これはカツオでも観察されており¹⁰⁶⁾、サバ型魚類に共通した過程かも知れない。その後の全長の伸びは、イシダイと同様に孵化後24時間まで急激に増加した後に緩慢となり、開口し眼が黒化する孵化後2.5日目頃に止まる。そして孵化後3.5日目以降は、同5日目まで減少傾向が観察された (Fig. II-2)。

摂餌開始時期について、イシダイでは体長の伸びが止まった時期と無給餌下において体長が減少し始める時期とのほぼ中間である⁸¹⁾。これをクロマグロについて当てはめると、水温24℃であれば孵化後3日目となる。したがってこの時期に給餌を開始することが適当である。しかし、孵化後の発育も水温の違いによって異なるので、水温が24℃以上であればこれより早く、24℃以下であれば遅くなることが推察される。

II-2. 卵発生に伴う化学成分および酵素活性の変動¹²³⁾

魚類における卵および仔魚の化学成分組成および生化学的性状については多くの研究が行われている¹²⁴⁻¹²⁹⁾。卵の化学成分組成には魚種間差があり、例えばウナギ, *Anguilla anguilla*, 卵では、乾物重量あたり約50%もの高い脂質を含有し, *Esox lucius* の卵ではタンパク質含量が高く乾物重量あたり約80%もある¹²⁶⁾。さらに、タンパク質、遊離アミノ酸 (FAA)、トリグリセライド (TG)、リン脂質 (PL) および糖質は単独あるいは複合で、沿岸魚類卵の胚発生中のエネルギー源として用いられる¹²⁶⁾。ニジマス, *Oncorhynchus mykiss* では、発生に伴って数種の水溶性ビタミンおよびトランスアミナーゼ活性が減少する¹³⁰⁾。しかし、クロマグロの卵、仔魚および稚魚の発育に伴う生化学的変化に関する報告はまだ見当たらない。典型的な浮魚であり大回遊を行うクロマグロの卵は、胚発生を通して特有の生化学的特徴をもつ可能性があり本種の種苗生産技術の中でも重要な餌料系列を検討する上での基礎資料として重要である。

II-2-1. 材料および方法

(1) 卵

供試卵は、1994年7月20日の17時から20時の間に1987年級群親魚の自然産卵によって得た。受精卵は、当日最初の産卵行動が観察された直後にネットで回収し、浦神実験場まで約30分を要して輸送した。卵割初期 (8細胞期以前) 卵の一部を濾紙で表面の水分を除いた後、液体窒素で凍結した。残りの卵を屋内の300 l容長方形水槽に收容し、水温を産卵時の27℃に調整 (ダイキンヒートポンプシステム) しながら緩やかにエアレーションを行った。その後の発生に

伴って、後期囊胚期、胚体形成期、クッパー胞出現期、心臓拍動期および孵化直前のステージに達した卵をそれぞれサンプリングし前述の方法で凍結した。卵の生存性の生物学的基準として、孵化率および正常孵化率を下記の式によって算出した。

$$\text{孵化率 (\%)} = (\text{総孵化仔魚数} / \text{総卵数}) \times 100$$

$$\text{正常孵化率 (\%)} = (\text{正常孵化仔魚数} / \text{総卵数}) \times 100$$

(2) 化学分析

卵の測定は各ステージ毎に3回繰り返して行った。卵の水分および窒素含有量はAOAC法¹³¹⁾に従い、Seoka et al.の行った方法¹³²⁾で測定した。卵は9倍量の5%トリクロロ酢酸溶液とともにPotter-Elvehemガラスホモジナイザーでホモジナイズし、1,500×gで20分間遠心分離した。生じた沈殿および上清を用いて、Lowry法¹³³⁾およびニンヒドリン法¹³⁴⁾によってタンパク質およびFAA量をそれぞれ測定した。卵はまた、ガラスホモジナイザーでエタノール-エチルエーテル(3:1, v/v)溶液と共にホモジナイズし、1,500×g, 4℃で20分間遠心分離して上清を回収した。その上清のTGおよびPL量を、トリグリセライドGテストワコーおよびリン脂質Cテストワコー(和光純薬社製)を用いてSuzuki et al.¹³⁵⁾の方法に従いそれぞれ測定した。卵の総エネルギーは、エネルギー換算係数¹³⁶⁾(タンパク質およびFAA, 5.5 cal/mg; TGおよびPL, 9.5 cal/mg)により算出した。FAAの平均分子量は、Ronnestad et al.¹³⁷⁾の報告に従い129.3と仮定した。氷冷した脱イオン水と共にガラスホモジナイザーで卵をホモジナイズし、10,000×g, 4℃で20分間遠心分離して得た上清を酵素液として用いた。アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ(EC 3.6.1.1; GOT)およびアラニンアミノトランスフェラーゼ(EC 3.6.1.2; GPT)活性をBergmer et al.¹³⁸⁾の方法で測定した。乳酸デヒドロゲナーゼ(EC 1.1.1.27; LDH), クレアチンキナーゼ(EC 2.7.3.2; CK)およびアルカリフォスファターゼ(EC 3.1.3.1; ALP)活性の測定には、それぞれWacker and Amador¹³⁹⁾, Szasz¹⁴⁰⁾およびBessey et al.¹⁴¹⁾の方法を一部改変して用いた。これらの活性は自動分析装置Vision System (Abbot Laboratories, IL, USA)を用いて測定した。活性は卵乾重1g当たりのunitsで表示した。なお、測定した条件下で1分間に生成される反応物1μmoleを1unitと定義した。

(3) 統計分析

データは一元配置分散分析($p < 0.05$)に供した。有意差が見られた場合には平均値をDuncan's Multiple Range Test¹⁴²⁾を用いて比較した($p < 0.05$)。

II-2-2. 結果

(1) 胚発生および孵化

Table II-3に示したように、クロマグロ卵は産卵後1時間以内、6.75, 8.17, 9.83, 16.5および22.5時間後に、それぞれ卵割初期、後期囊胚期、胚体形成期、クッパー氏胞出現期、心臓拍動期および孵化直前に達した。産卵23時間後には半数が孵化した。孵化率および正常孵化率は98および96%と高かった。

Table II -3. The Pacific bluefin tuna egg stage used for analysis

| Time sfter spawning (h) | Egg stage |
|-------------------------|----------------------------------|
| <1 | Early cleavage (EC)* |
| 6.75 | Late gastrula (LG) |
| 8.17 | Appearance embryo (E) |
| 9.83 | Appearance Kupffer's vesicle (K) |
| 16.5 | Heart beat initiation (H) |
| 22.5 | Just before hatching (BH) |
| 23.0 | 50% hatching |

(2) 化学成分組成および総エネルギー

胚発生期間中の卵の化学成分組成の変動を Fig. II-9 に示した。水分、総窒素および PL 含有量はそれぞれ約 92.6%, 95 mg/g 乾重および 80 mg/g 乾重であり発生段階間で有意な差はなかった。タンパク質は卵割初期の 200 mg/g 乾重から孵化直前の 254 mg/g 乾重まで直線的に僅かに増加した。卵割初期から後期囊胚期およびクッパー胞出現期から孵化直前の 2 期間において、FAA はそれぞれ 1.8 から 1.6 mmol/g 乾重および 1.6 から 0.8 mmol/g 乾重に減少した。

TG 含有量は、卵割初期には 420 mg/g 乾重であったが、孵化直前には 140 mg/g 乾重にまで減少した。TG の減少は胚体形成期以降加速した。

各ステージの卵の総エネルギーを算出して Fig. II-10 に示した。卵乾重 1g 当たりの総エネルギーは卵割初期の 7.2 kcal から孵化直前の 4.1 kcal まで減少したが、胚体形成期以降で顕著であった。従って、孵化直前には卵割初期の総エネルギーの 57%まで減少したことになる。発生過程での卵 TG のエネルギーの変動は総エネルギーの減少とほぼ一致しており、卵割初期の 4.0 kcal/g 乾重から孵化直前の 1.3 kcal/g 乾重にまで減少した。卵タンパク質のエネルギーは、卵割初期の 1.1 kcal/g 乾重から孵化直前の 1.4 kcal/g 乾重までわずかに増加した。卵の FAA のエネルギーは卵割初期の 1.3 kcal/g 乾重から孵化直前の 0.6 kcal/g 乾重まで減少した。卵 PL のエネルギーは、発生期間中を通して約 0.75 kcal/g 乾重であり、明瞭な変動はみられなかった。

(3) 酵素活性

胚発生期間中の酵素活性の変動を Fig. II-11 に示した。GPT, CK および LDH 活性は、卵割初期からクッパー胞出現期にかけて減少した後、孵化直前にかけて増加した。

GOT 活性は胚発生期間を通して GPT よりも高い活性で推移したが、クッパー胞出現期および孵化直前には急減した。ALP 活性は他の酵素とは異なるパターンで変化した。卵割初期および胚体形成期には高い ALP 活性が認められ、クッパー胞出現期以降は極端に低い値で推移した。

II-2-3. 考察

供試卵は高い孵化率および正常孵化率が示すように正常に発生し、サンプリングを行う上で問題はなかった。胚発生期間中の卵の水分、総窒素およびリン脂質含有量は比較的一定のレベルで推移した。卵割初期の卵はその乾物のほとんどがタンパク質、FAA, TG および PL により構成

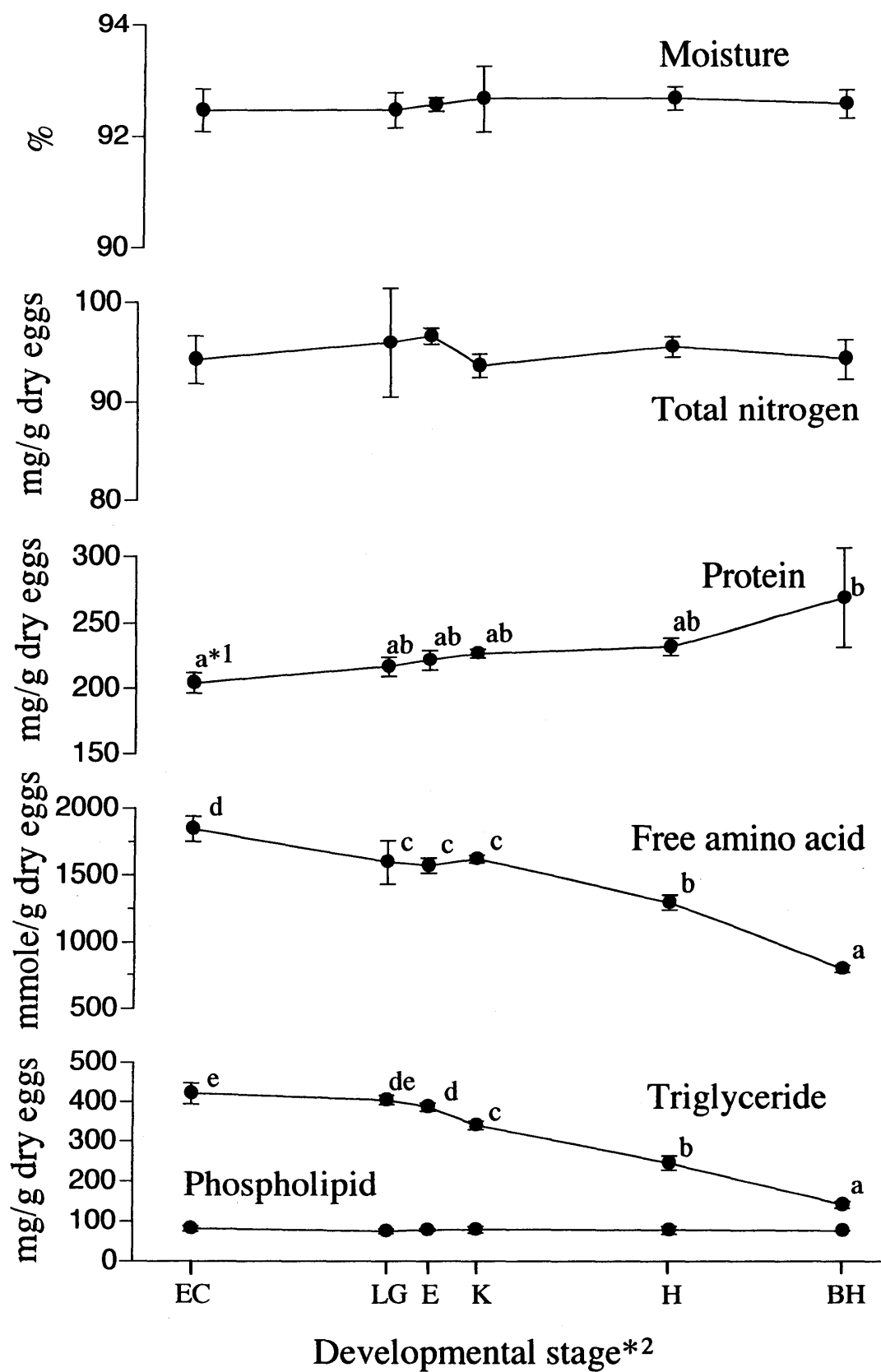


Fig. II-9. Changes in egg moisture and chemical constituents with embryonic development of the Pacific bluefin tuna. Values are mean SD ($n=3$).

*1 Values marked with the same letter are not significantly different ($p<0.05$).

*2 Refer to Table II-3.

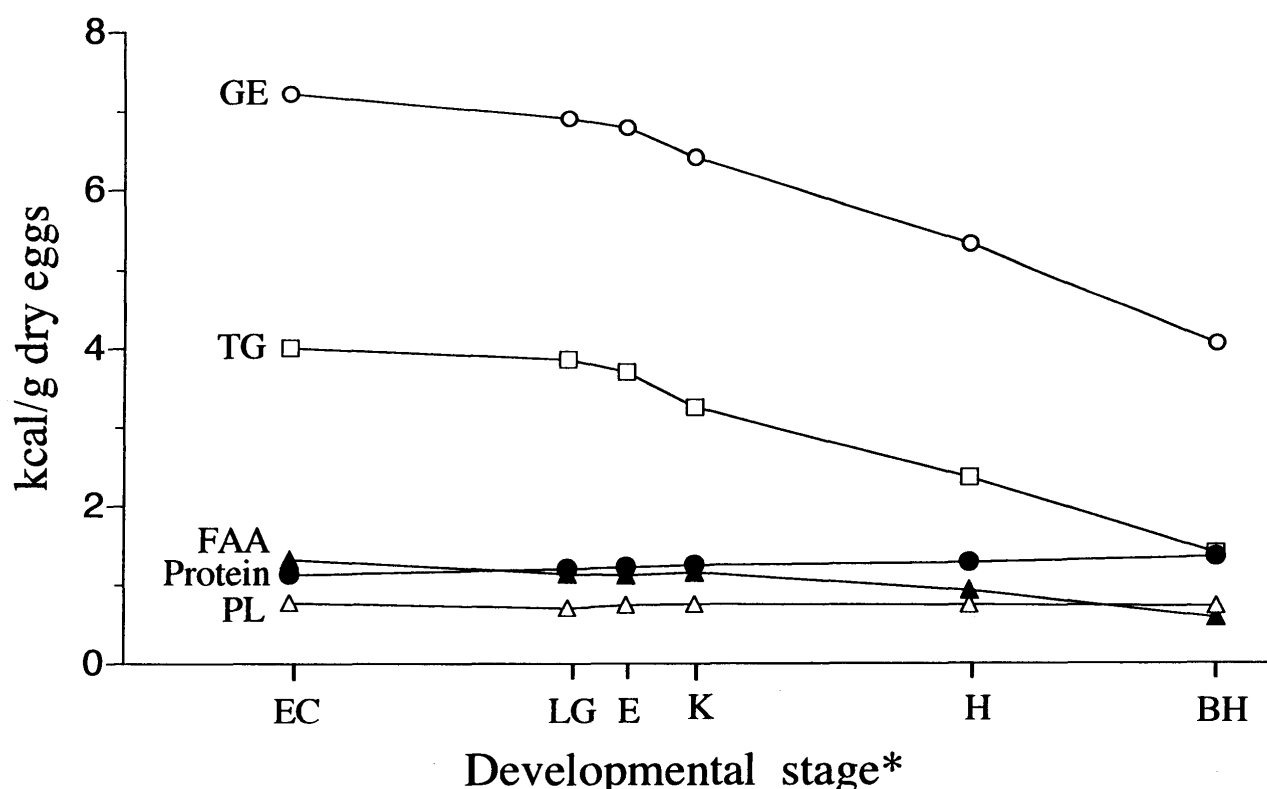


Fig. II-10. Changes in egg gross energy (GE) and protein, free amino acid (FAA), Triglyceride (TG), and phospholipid (PL) energy with embryonic development of the Pacific bluefin tuna.

* Refer to Table II-3.

されていた。TG 含有量は胚体形成期以降顕著に減少した。FAA もまた胚体形成期以降着実に減少し、タンパク質含量は胚発生期間中に増加した。

さらに、発生期間中に卵の総エネルギーの減少パターンと同じような減少パターンが卵 TG のエネルギーにおいても認められた。これらの結果から、胚発生期のクロマグロ卵は TG を主な内部栄養源として利用することが示唆された。直径約 0.97 mm の小さなクロマグロ卵において、高エネルギーの脂質を蓄積することは有利であると考えられる。他のサバ型魚類卵を含めて、卵の高 TG 含量に関するさらなる検討が必要である。

Ostrowski and Divakaran¹⁴³⁾ は、シイラ, *Coryphaena hippurus*, の孵化日を除く卵および仔魚期を通して、脂質が主要な内部エネルギー源であることを示唆している。ヨーロッパヘダイ, *Sparus auratus*¹³⁷⁾, winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*¹⁴⁴⁾, タイセイヨウダラ, *Gadus morhua*¹⁴⁵⁾, Atlantic halibut, *Hippoglossus hippoglossus*¹⁴⁶⁾, サヨリ, *Hemiramphus sajori*¹⁴⁷⁾ およびマダイ¹¹⁾ 卵は、胚発生のエネルギー源としてタンパク質, FAA, TG および炭水化物の中から二つあるいは三つの栄養素を組み合わせる。これらの結果は、魚類の胚発生においてエネルギー源として利用される栄養素のタイプには種間差のあることを示している。Kamler¹²⁶⁾ は、種間差は卵の直径および重量、最適温度、孵化までの所要時間および淡水あるいは海水といった用水の違いと直接的あるいは間接的に関係することを示唆した。さらに、Ronnestad and Fyhn¹²⁴⁾ は、種間差は後期仔魚期および稚魚期の栄養要求と深い関連のあることを示している。クロマグロにおいて卵発生の間に TG が急激に減少したことは、急速な成長をサポートするために後期仔魚期および稚魚期の脂質要求が高いことを示唆する。

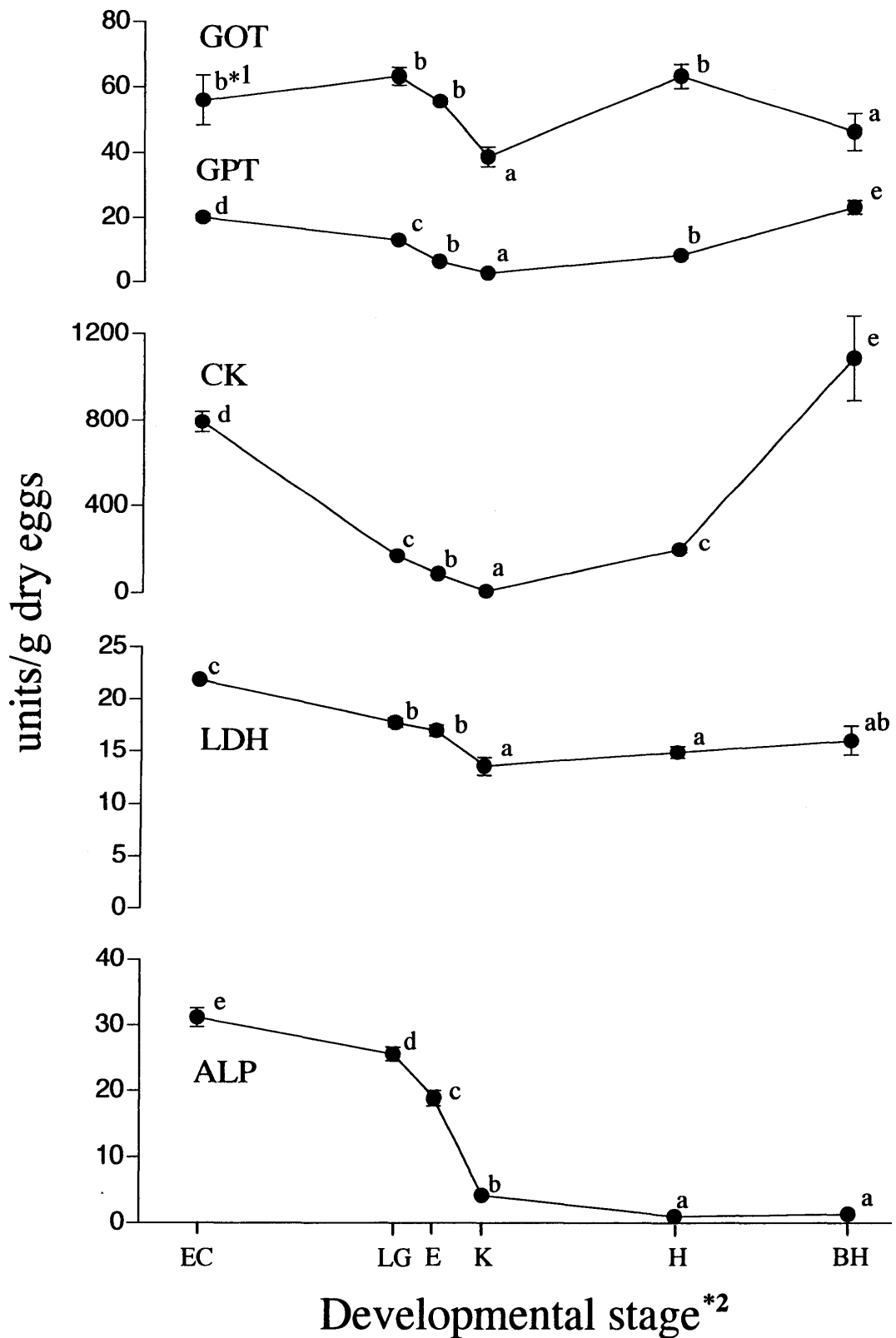


Fig. II-11. Changes in egg alanine aminotransferase (GPT), aspartate aminotransferase (GOT), creatine kinase (CK), lactate dehydrogenase (LDH), and alkaline phosphatase (ALP) activity with embryonic development of the Pacific bluefin tuna. Values are mean ± SD ($n=3$).

*1 Values marked with the same letter are not significantly different ($p<0.05$).

*2 Refer to Table II-3.

一方、本実験では卵 FAA のエネルギーを、Ronnestad et al.¹³⁷⁾ に従って分子量を 129.3 と仮定して算出した。発生期間中の卵 FAA のエネルギーの減少は卵タンパク質エネルギーの増加よりも大きかった。FAA はエネルギー源として必須の成分であるだけでなく、ペプチドやタンパク質以外の生理的に不可欠な含窒素成分の合成にも必要であることが知られている。特に、マダイ¹³²⁾ においてもみられるように、クロマグロ卵の RNA および DNA 含有量は細胞増殖および器官の分化に伴い急激に増加したと考えられる。さらに本研究でクロマグロの卵割初期卵には乾物重量あたり 42% もの TG が含まれていることを見いだした。このことにより、卵の直径がほぼ同じで TG 含量の低いマダイ卵¹⁴⁸⁾ よりもクロマグロ卵の密度の方が低くなる。このように高い浮力は、海面での急速な拡散によって、クロマグロ卵の生残戦略をサポートするものと考えられる。

魚類の初期発生における酵素の特徴を調べた研究は数少ない^{130, 132)}。本実験において、GOT, GPT, CK および LDH の活性は卵割初期とクッパー胞出現期との間に減少し、その後孵化直前にかけて増加する傾向がみられた。同じような傾向がマダイ卵¹³²⁾ においても認められるが、CK 活性はクロマグロ卵の方が高かった。クロマグロ卵の ALP 活性は発生期間中に急激に減少した。ALP 活性は、極端に低いレベルであったマダイ¹³²⁾ に比べ、後期囊胚期までは非常に高いレベルで推移した。高い ALP 活性は、様々な供給源からのリン酸の供給によって高エネルギーリン酸結合を生じることと関係していると考えられる。LDH および CK 活性が卵割初期に高いことも解糖系およびクレアチンリン酸からエネルギーを供給することと関連しているのであろう。さらに、クロマグロの胚発生期間中の酵素活性の変動パターンは、酵素合成の機構の差異と関連していると思われる。両生類¹⁴⁹⁾ でみられるように、母親由来の RNA および胚の遺伝子は、クッパー胞出現期の前および後でそれぞれ機能する。酵素活性の器官分布は、GOT はほとんど全ての器官で、GPT は肝臓で、CK は神経および筋肉で、LDH は肝臓、腎臓および筋肉で、ALP は腸および胎盤であることが一般に知られている¹⁵⁰⁾。ALP を除くこれらの酵素活性の増加はまた、クロマグロ卵においてクッパー胞出現期の直前あるいは直後に器官分化および形成が始まることを示している。

本研究によって、クロマグロの胚発生において TG が主要なエネルギー源として重要な役割をもつことを明らかにした。クロマグロの大量種苗生産技術の確立のためには、今後さらに、仔魚および稚魚の TG 含量および脂肪酸組成について検討する必要がある。

第三章 仔稚魚の発育

魚類の種苗生産過程における大きな減耗は、一般的に餌付け後の飼育初期と、魚種によっては“共喰い”現象が発現する postflexion 期から稚魚期にかけてみられる。さらに、クロマグロの種苗生産過程では、これらに加えて稚魚期以降の突進遊泳が引き起こす衝突死という大きな減耗期が存在する。種苗を量産するためにはこれらの対策が必要であり、成長に伴う各発育段階に適した餌料の選択と環境を整えなければならない。そのためには、仔稚魚の成長と発育過程を把握し、それに伴う外部形態の変化、各組織、器官の発達過程、生理生態的特性を知る必要がある。仔稚魚の発育過程において、ある成長段階で相対成長が絶対成長と異なる様式を呈する部分を成長屈折点と呼び、生理生態学的な変化が生じていることが多いとされる¹⁵¹⁾。従って、種苗生産における基礎知見として、成長様式とそれに伴う形態の変化を知することは重要である。またそれは、天然の漁業における知見としても有用である。

しかし、マグロ類のような外洋性魚類では、初期生活史の大部分が未解明である。本章では、クロマグロの孵化から種苗サイズとされる若魚期までの、これら発育過程を明らかにする目的で実験を行った。

III-1. 発育に伴う外部形態の変化

クロマグロの発育初期の形態については、これまでに幾つかの報告があるが^{54, 152-154)}、これらの研究は、マグロ類仔魚の種の同定を行う目的のために、体の黒色素胞パターンに重きが置かれている。しかし野生の標本では、初期発育ステージの全系列を得ることの難しさのために、黒色素胞パターンの個体発生に伴う変化が未だ十分に明らかにされていない。

最近、野生の標本の研究のほかに、太平洋の飼育クロマグロの標本から情報が集められるようになった。それは野生資源増強のためにクロマグロの種苗生産について、精力的に研究され始めたからである^{19, 35, 38, 155)}。しかしながら、初期発育に関する知見は未だ十分とはいえない。

そこで本研究では、クロマグロの孵化から若魚期に至る形態発育を、飼育標本を調べることによって明らかにした。

III-1-1. 仔魚期から稚魚期¹⁵⁶⁾

III-1-1-1. 材料および方法

(1) 供試魚

1987年級群クロマグロの親魚(満7歳)が1994年7月10日午後6時頃に自然産卵した受精卵を供試した。生簀内から採集した卵は、陸上の飼育水槽内に設置したゴースネット内でおおよそ12時間卵管理を行った後、20 m³容量の飼育水槽へ収容した。仔魚は7月11日の午後10時頃孵化した。本研究では、孵化後24時間を0日として日齢を計算した。

実験期間中の水温は 27.7~24.5℃ (平均 25.5℃) の範囲で変動した (Fig. III-1)。得られた仔魚は、孵化後 2~22 日目までワムシ, *Brachionus rotundiformis* を, 10~25 日目まで アルテミア, *Artemia salina* のノープリウスを, 12~30 日目までイシダイの孵化仔魚を, それぞれ与えて飼育した。

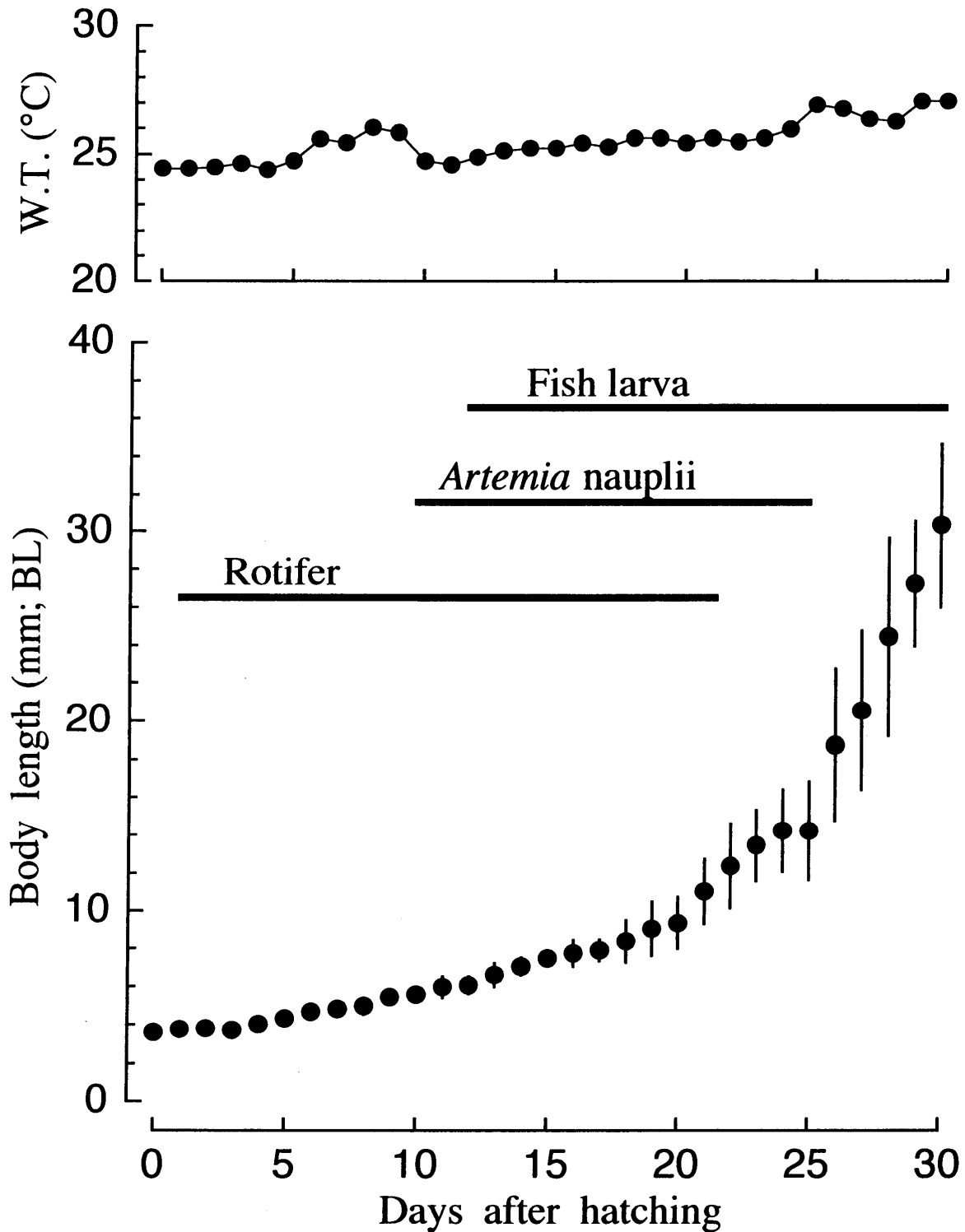


Fig. III-1. Body length, diet and water temperature during the rearing of the Pacific bluefin tuna. Vertical lines indicate mean \pm SD ($n=20$).

(2) 測定および観察方法

孵化後0日目(7月12日)から30日目(8月11日)まで毎朝10時に、20個体のサンプルを採取した。全ての標本は、MS-222麻酔下で実体顕微鏡に装着したビデオカメラによってビデオイメージを撮影した後、5%ホルマリンで保存した。その後、これらのビデオイメージから、体各部の10部位、全長(TL)、体長(BL)、肛門前長(PL)、体高(BH)、頭長(HL)、頭高(HH)、吻長(SnL)、眼径(ED)、尾柄高(CPD)および上顎長(UJL)を計測した。

ビデオイメージ中の長さは、米国保健衛生研究所で開発されたソフトウェア NIH Image を使用して±1%の精度で測定した。この実験での標本のサイズは体長で表した。なお、BLの測定は、尾索屈曲以前あるいは屈曲中では上顎先端から脊索後端まで、尾索屈曲後は上顎先端から下尾骨後縁までとした。全ての標本(620標本; 3.49~37.78 mm BL)は絶対成長、相対成長、色素胞分布および棘の発達の観察に供した。

これらの毎日採取した標本のうち69標本(5.26~33.68 mm BL)は、棘の発達と鱗形成の観察をより容易にするために alizarin red-S で染色した。孵化後3~16日目の標本($n=180$; 3.63~9.96 mm BL)では、特に躯間部の黒色素胞の位置を筋節に対して識別した。また、赤色素胞分布を明らかにするために、孵化後0~22日目(3.38~26.76 mm BL)まで不規則な間隔で1~5個体の標本を採取($n=53$)し、MS-222麻酔の下で観察した後、保存した。これらの標本に加えて、孵化直後から72時間後まで、このステージの間の形態発育を詳しく調べるために、随時サンプリングを行った。この実験で使用した標本の代表系列は、京都大学水産実験所の Aquatic Natural History Museum に登録した(FAKU 129041-129075)。

(3) 相対成長の解析

相対成長は、体長を基準とした一般的なアロメトリー式($\ln y = \ln a + b \ln x$)で表した^{42, 157)}。ここで、 x はBL(mm)、 y は各部位の長さ、 a は始原成長指数、 b は相対成長係数である。また、本研究ではアロメトリー式における相対成長係数が1.1より大きい場合に優成長、0.9以上1.1以下を等成長、0.9より小さい場合に劣成長とした。

III-1-1-2. 結果

(1) 形態の概説

クロマグロ仔稚魚の形態発育の概容を Fig. III-2 に図示した。

サバ科仔魚に共通の形態上の特徴は(1)大きな頭、大きな口、大きな眼;(2)頭部の棘の発育発達、そして(3)肛門の体後部への移動¹⁵⁸⁾である。

黒色素胞パターンは、マグロ類仔魚¹⁵²⁾を分類査定するために広く使用され支持されている特徴である。赤色素胞パターンは、上柳¹⁵⁹⁾、Matsumoto et al.¹⁵²⁾によってマグロ類仔魚を確認するもう1つの特徴として提案された。

(2) 絶対成長

供試したクロマグロ受精卵の直径は 1.02 ± 0.02 mm (平均±SD, $n=20$)で、油球のそれは 0.26 ± 0.05 mmであった。孵化仔魚の体長は、 2.83 ± 0.16 mm (平均±SD, $n=20$)であった(Fig. III-2A)。

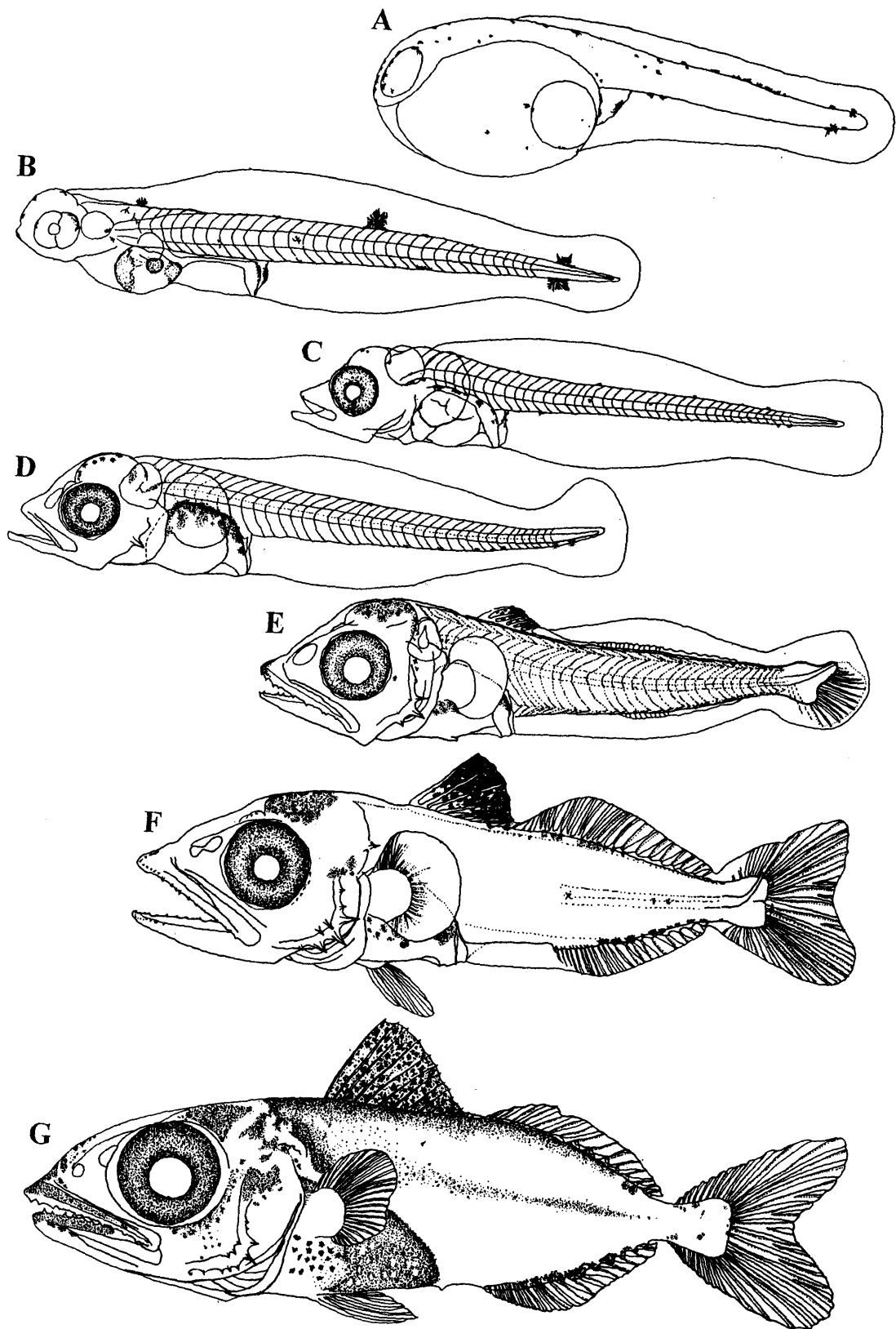


Fig. III-2. Development of the Pacific bluefin tuna. (A) newly hatched larva, 2.91 mm BL; (B) 1-day-old prelarva, 3.54 mm BL; (C) 4-day-old preflexion larva, 4.02 mm BL; (D) 7-day-old flexion larva, 5.34 mm BL; (E) 15-day-old postflexion larva, 7.23 mm BL; (F) 20-day-old postflexion larva, 8.64 mm BL; (G) 25-day-old, juvenile, 13.55 mm BL.

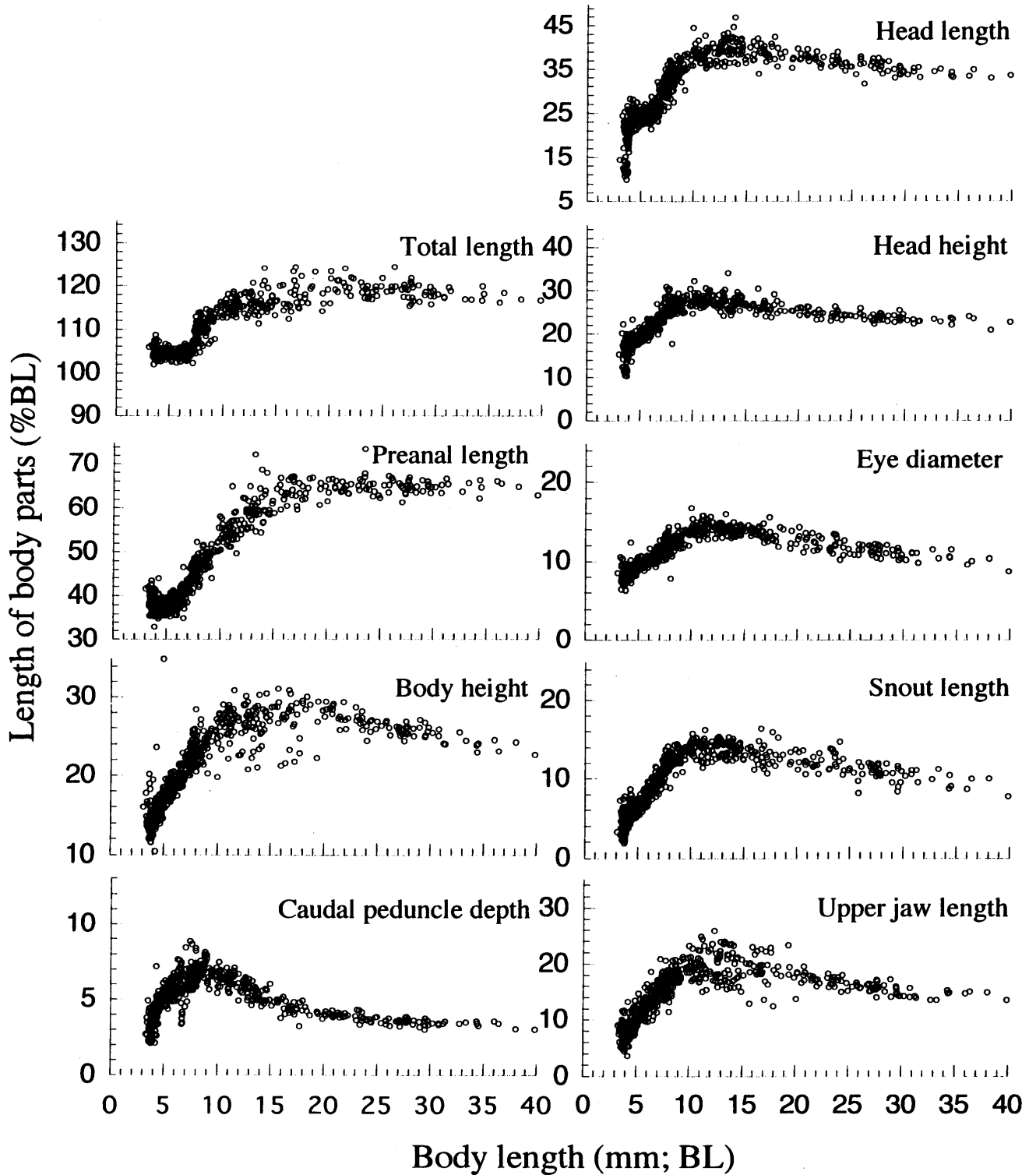


Fig. III-3. Some body proportions of the Pacific bluefin tuna shown as percentages of body length.

仔魚は孵化後 3 日目 (3.81 ± 0.14 mm BL) に開口し、摂餌を始めた。卵黄は、孵化後 5 日目 (4.32 ± 0.13 mm BL) まで存在した。仔魚は、孵化後 10 日目には 5.58 ± 0.35 mm BL, 20 日目には 9.34 ± 1.36 mm BL, 30 日目には 30.36 ± 4.34 mm BL に成長した (Fig. III-1)。孵化から 20 日目までの体長の成長率は 0.33 mm/day で、それは 20 日目、 9.3 mm BL から 2.10 mm/day に増加した。

(3) 脊索の屈曲

脊索後端は仔魚が 5.76 mm BL に達したとき屈曲を始め、まっすぐな脊索を持つ最も大きな標本は 5.83 mm BL であった。最も小さい前屈曲仔魚は 7.46 mm BL、最も大きな屈曲中の仔魚は 8.65 mm BL であった。従って屈曲仔魚ステージは、6～8 mm BL (Fig. III-2E) の範囲と考えられる。

(4) 相対成長

肛門前長を除いて、体長に対して測定した 9 つの体各部の相対サイズは、一旦増加した後減少した (Fig. III-3)。頭部の全ての相対長さが、11～13 mm BL で最大値に達した。すなわち頭長比 40%，13 mm BL；頭高比 27%，11 mm BL；眼径比 15%，11 mm BL；吻長比 14%，12 mm BL；上顎長比 20～30%，12 mm BL であった。

体長約 8 mm BL で、尾柄高比が最大値（平均 7%）に達した。これらに対して、体全体の長さ、すなわち、体高比と全長比はより大きなサイズである 16 mm BL および 20 mm BL で最大値に達した。肛門前長の体長に対する比率は、3～7 mm BL の 35～44% から増加し、15 mm BL でおよそ 65% に達した。それ以降、比率の顕著な変化は起こらなかった。

本研究では、3.49 BL から 37.78 mm BL までの相対成長が得られた。この範囲における魚体各部の長さの体長に対する相対成長をアロメトリー式に回帰し、Fig. III-4, 5 および Table III-1 に示した。今回測定した体長を除く 9 部位の相対成長様式は、3～4 点の成長屈折点を有する多相アロメトリーを呈した。頭長、頭高、吻長、上顎長、眼径および尾柄高の 6 部位で成長屈折点が 4 mm BL に集中して認められた。また、6～8 mm BL ですべての部位に成長屈折点が認められた。すべての部位で 10 mm BL まで優成長を示したが、以後、体高、上顎長および尾柄高が等成長または劣成長に変わり、体高を除くその他の部位でも 12～16 mm BL までに成長屈折点が認められ、劣成長に転じた。劣成長に転じるのが最も遅かったのは体高で、20 mm BL であった。

(5) 鰭条の発育

観察可能な背鰭棘を備えた鰭条を持つ最も小さな標本は 6.32 mm BL であった。尾鰭鰭条は 7.10 mm BL で最初に出現し、背鰭軟条、腹鰭、臀鰭、胸鰭の鰭条はそれぞれ 7.76, 8.00, 8.47 および 8.67 mm BL で出現した。不完全な鰭条数を持つ最も大きな標本は 10.02 mm BL であった一方で、完全な成体の鰭条数^{2, 160)}を持つ最も小さな標本は 9.68 mm BL であった。

(6) 色素胞分布

黒色素胞 孵化仔魚 (2.62～3.05 mm BL) には体全体、頭部、脊索、卵黄、油球に小さな黒色素胞が散在したが、鰭膜には存在しなかった (Fig. III-2A)。孵化後 1 日目の仔魚 (3.35～3.74 mm BL, Fig. III-2B) は、この体長範囲でサイズに関わりなく、以下のような黒色素胞パターンの特徴を示した。

吻から前脳、中脳にかけて存在する網目状黒色素胞；消化器官背部の黒色素胞；体前部、中間部、尾部の 3 つの外部の黒色素胞の塊；脊索背側の小さい黒色素胞；脊索毎の黒色素胞（脊索中間部の直線状の小さな黒色素胞と尾部腹側の外部黒色素胞の塊）；脊索前部で体側に出現する外

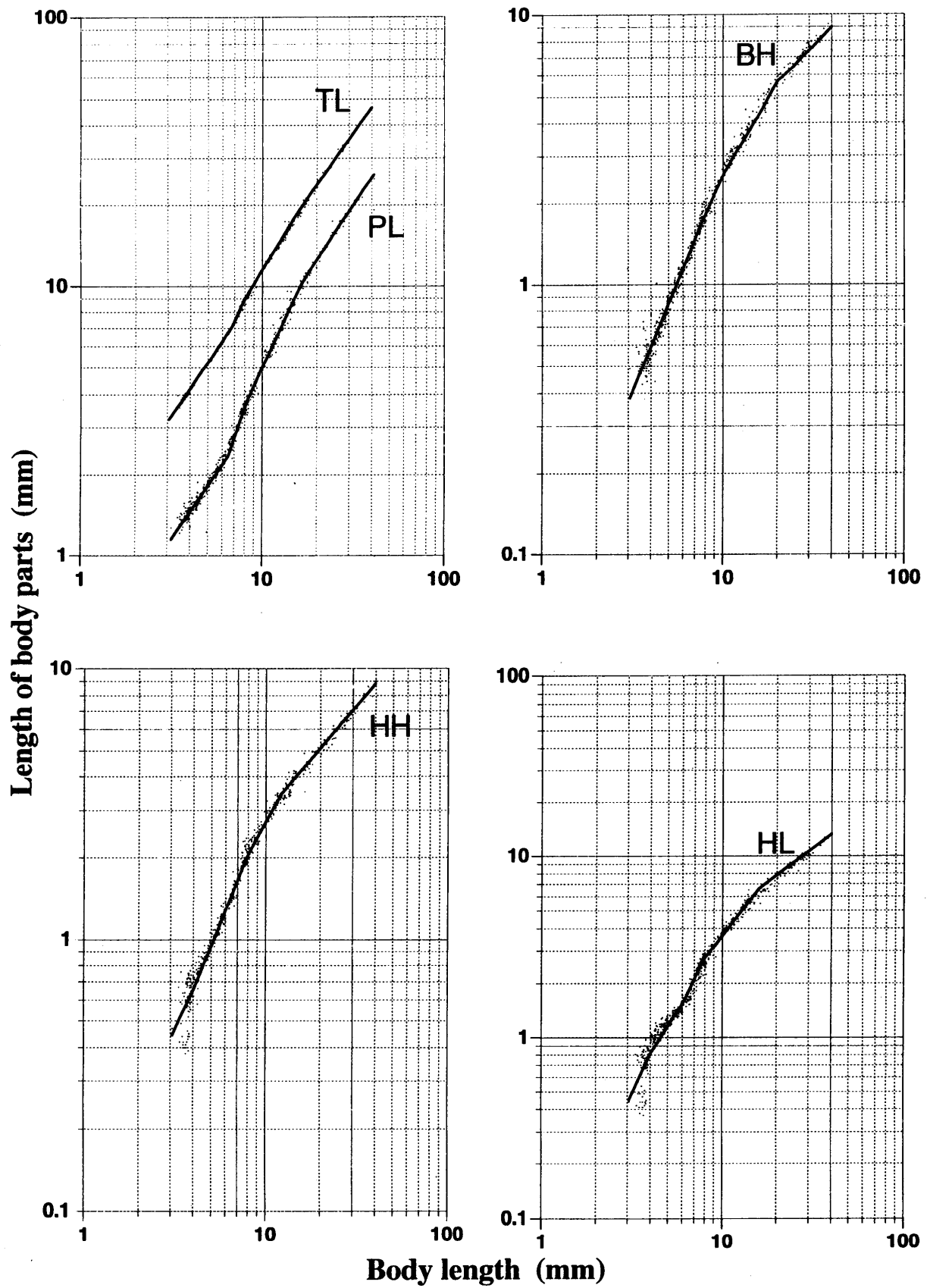


Fig. III-4. Relative growth of the Pacific bluefin tuna. TL, total length ; BH, body height ; PL, preanal length ; HH, head height ; HL, head length.

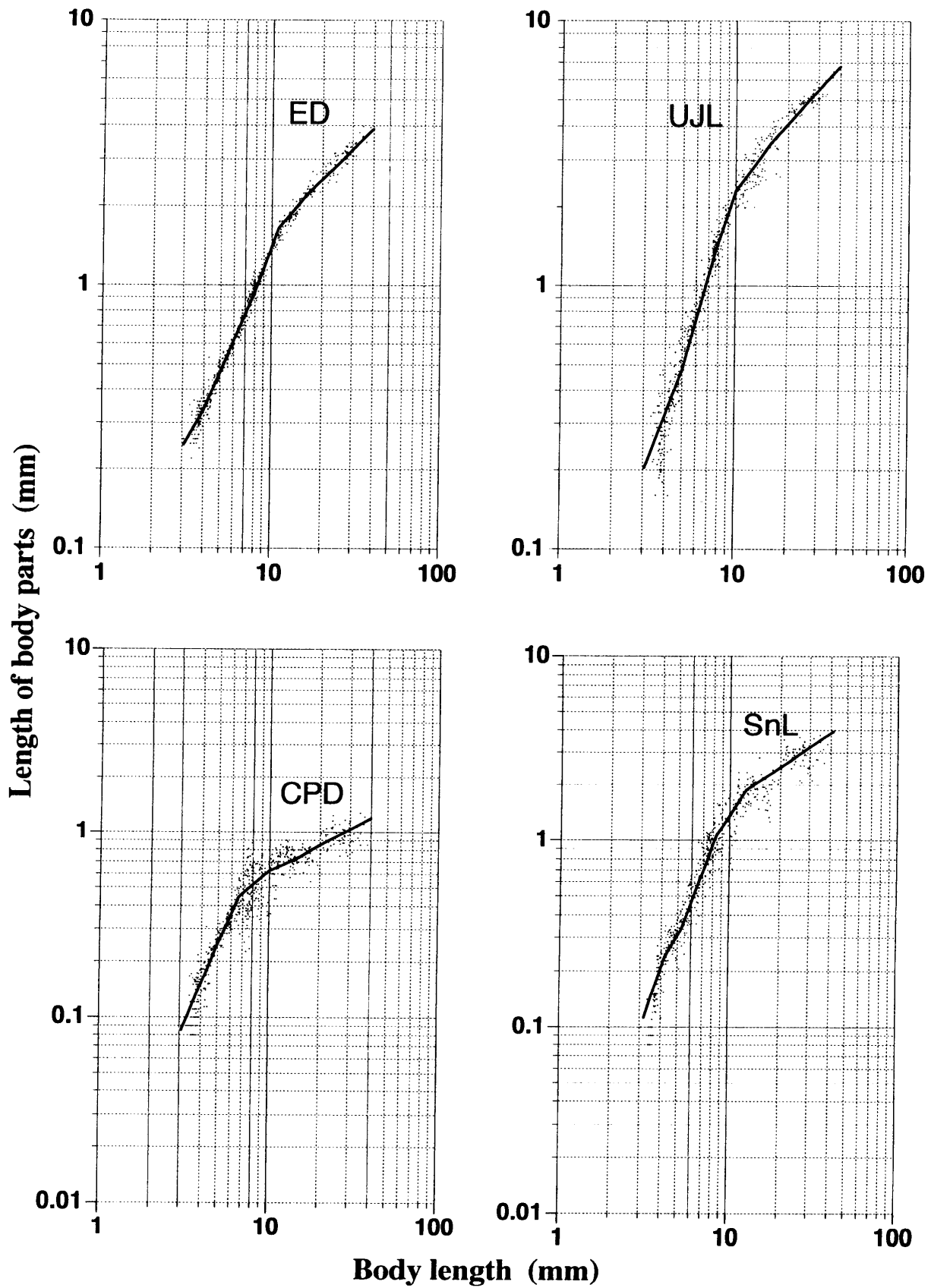


Fig. III-5. Relative growth of the Pacific bluefin tuna. ED, eye diameter ; UJL, upper jaw length ; CPD, caudal peduncle depth ; SnL, snout length.

Table III -1. Allometry of the Pacific bluefin tuna (from larva to juvenile stage)

| Body parts | Range of body length (mm) | Allometry | | Correlation coefficient (R^2) |
|----------------------|------------------------------|-----------|------|--------------------------------------|
| | | ln a | b | |
| Total length | BL<6.8 | 0.06 | 0.99 | 1.0 |
| | 6.8≤BL<8.0 | -0.84 | 1.46 | 0.92 |
| | 8.0≤BL<16.0 | -0.13 | 1.11 | 0.97 |
| | 16.0≤BL | 0.16 | 1.00 | 0.99 |
| Preanal length | BL<6.3 | -0.98 | 1.00 | 0.93 |
| | 6.3≤BL<8.0 | -2.33 | 1.76 | 0.89 |
| | 8.0≤BL<16.0 | -1.72 | 1.46 | 0.97 |
| | 16.0≤BL | -0.42 | 0.63 | 0.96 |
| Head length | BL<4.0 | -3.33 | 2.25 | 0.17 |
| | 4.0≤BL<6.0 | -2.01 | 1.36 | 0.85 |
| | 6.0≤BL<8.0 | -3.66 | 2.25 | 0.85 |
| | 8.0≤BL<16.0 | -1.68 | 1.39 | 0.95 |
| | 16.0≤BL | -0.33 | 0.79 | 0.94 |
| Snout length | BL<4.0 | -4.11 | 1.69 | 0.59 |
| | 4.0≤BL<5.0 | -3.82 | 1.68 | 0.37 |
| | 5.0≤BL<8.0 | -5.22 | 2.51 | 0.94 |
| | 8.0≤BL<12.0 | -2.89 | 1.38 | 0.82 |
| | 12.0≤BL | -1.07 | 0.65 | 0.87 |
| Upper jaw length | BL<5.0 | -4.16 | 2.14 | 0.50 |
| | 5.0≤BL<7.7 | -4.12 | 2.17 | 0.86 |
| | 7.7≤BL<10.0 | -3.73 | 1.98 | 0.60 |
| | 10.0≤BL<16.0 | -1.28 | 0.91 | 0.51 |
| | 16.0≤BL | -0.48 | 0.64 | 0.75 |
| Eye diameter | BL<4.0 | -2.65 | 1.11 | 0.18 |
| | 4.0≤BL<8.0 | -3.17 | 1.50 | 0.96 |
| | 8.0≤BL<11.0 | -3.53 | 1.67 | 0.83 |
| | 11.0≤BL<16.0 | -1.66 | 0.88 | 0.78 |
| | 16.0≤BL | -0.82 | 0.59 | 0.83 |
| Head height | BL<4.0 | -0.25 | 1.51 | 0.13 |
| | 4.0≤BL<8.0 | -3.17 | 1.50 | 0.96 |
| | 8.0≤BL<12.0 | -3.53 | 1.67 | 0.83 |
| | 12.0≤BL | -1.18 | 0.70 | 0.94 |
| Body height | BL<7.6 | -2.77 | 1.62 | 0.96 |
| | 7.6≤BL<10.2 | -2.29 | 1.40 | 0.76 |
| | 10.2≤BL<20.0 | -1.51 | 1.08 | 0.91 |
| | 20.0≤BL | -0.28 | 0.67 | 0.90 |
| Caudalpeduncle depth | BL<4.0 | -4.67 | 1.97 | 0.13 |
| | 4.0≤BL<6.6 | -4.76 | 2.09 | 0.83 |
| | 6.6≤BL<10.0 | -3.86 | 1.50 | 0.35 |
| | 10.0≤BL<15.5 | -1.28 | 0.38 | 0.22 |
| | 15.5≤BL | -1.94 | 0.58 | 0.82 |

部黒色素胞である。なお、眼はこの時まで着色した。

孵化後2日目の仔魚（3.40～4.18 mm BL）では、サイズに関わりなく、黒色素胞のパターンは、孵化後1日目からそれより日数の多い前屈曲仔魚への遷移的状态を示した。吻部の黒色素胞が消失し、外部黒色素胞の集団が背部前部（2番目の筋節）、背部中間部（第17から第21筋節）、背部尾部（第30から背鰭が第39筋節）に、また、腹部中間部（第14から第26筋節）、腹部後部（第28～39筋節）に出現した。また、体側中間部および後部（第13筋節より後部）の色素胞はまだ大きかったが、後部で縮小し始めた（Tables III-2, 3, 4 および 5）。

孵化後3日目には、3.41～4.23 mm BLの体長範囲の標本のなかで、上述の遷移黒色素胞パターンを示した最も大きい標本は3.82 mm BLであった。前脳の黒色素胞は、3.76 mm BLより大きな標本では総てこれを欠いていた。また、これを欠く最も小さい標本は3.63 mm BLであった。3.82 mm BLより大きな総ての標本は、以下のように、日齢の大きな前屈曲仔魚の黒色素胞パターンを示した。

黒色素胞は消化器官の背部に散在し、後の発育ステージでは消化器官上部黒色素胞覆いを形成した。脊索背部、腹部、そして横側の外部黒色素胞の一団は収縮し、別の黒色素胞のスポットが出現した（Tables III-2, 4, 5）。中脳、後脳背部前部および基部に黒色素胞が出現した。数個の黒色素胞が下顎の内側に出現した。下顎上に黒色素胞を持つ最も小さな標本は3.41 mm BLであった。そしてこれを欠く最も大きな標本は孵化後16日目の9.46 mm BLであった。しかし、5.5 mm BLより大きなほとんど総ての標本はこれらの黒色素胞を持っていた。

孵化後4日目（3.92～4.43 mm BL）における総ての標本は、前屈曲仔魚（Fig. III-2-C）の黒色素胞パターンを持っていた。黒色素胞は、およそ4.5 mm BLより大きな仔魚で、いくつかの他の部位で発達し始めた（Fig. III-2-E～F）：4.49 mm BL（Table III-6）における軀幹部内部、5.47 mm BLにおける上顎先端、6.18 mm BLにおける主鰓蓋骨および前鰓蓋骨、6.32 mm BLにおける第1背鰭鰭膜と、6.83 mm BLにおける再び前脳、10.79 mm BLにおける鎖骨縫合。

これらの黒色素胞を欠く最も大きな標本は、上顎先端では6.44 mm BL、下顎先端では6.72 mm BL、主鰓蓋骨では6.94 mm BL、前脳では9.69 mm BL、鎖骨縫合では10.28 mm BL、前鰓蓋骨では10.49 mm BLであった。およそ6.5 mm BLから、消化器官背部の覆いを形づくっている黒色素胞は大きくなり、7.5 mm BL以上でのそれらいくつかの標本では消化器官の腹部表面に達した。

軀幹部の黒色素胞の分布パターンは成長と共に変化した。背部の黒色素胞は4.5～7.0 mm BLの間に軀幹部前部から消失した。また、腹部および体側部の黒色素胞は、軀幹部前部から消失した（Tables III-2, 3, 4 および 5）。

およそ8 mm BLからの仔魚は部分的に稚魚期の黒色素胞（Fig. III-2-F）を示した：背部の黒色素胞が軀幹部前部で出現した。そして軀幹部中間部および後部ではその頻度が7.5 mm BL（Table III-2）から増加した；内部黒色素胞が軀幹部中間部および後部で頻出するようになった（Table III-6）；およそ8.0 mm BLから、第2背鰭、臀鰭基部の密集した黒色素胞集団（Table III-7 および 8）、眼周囲、特に眼の下および後ろ側；内部黒色素胞が、脊索、神経関節突起および血管関節突起の近くで現れた。そして軀幹部中央側部における外部の黒色素胞が、およそ8.2 mm BLから内部へと延長した。稚魚の色素胞分布の特徴（すなわち密集した色素胞のパッチ）を持つ

Table III -2. Incidence of melanophores on the dorsal edge of the trunk (%) in the Pacific bluefin tuna. Each melanophore is recorded for the myomere on which it occurs. The number of specimens examined at each size range is shown

| No. of myomere | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | No. of specimen | |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|----|----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|----|
| Size range (BL, mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.50-3.99 | 14 | | | | | 7 | | | | | | 14 | 7 | 7 | 7 | 36 | 29 | 36 | 29 | 29 | 7 | 7 | | | | | | 7 | 7 | 7 | 14 | 14 | 21 | 36 | 43 | 14 | 14 | 7 | 14 | 14 | |
| 4.00-4.49 | 4 | 4 | | | | | | | 4 | 15 | 4 | 4 | 7 | 7 | 15 | 41 | 22 | | 7 | 22 | 7 | 7 | 19 | 15 | 4 | 11 | 19 | 4 | 19 | 19 | 33 | 30 | 26 | 30 | 15 | 19 | 27 | | | | |
| 4.50-4.99 | | | | 4 | 4 | | | | | | | | 4 | 4 | 7 | 15 | 7 | 7 | 11 | 4 | 4 | 4 | 7 | 11 | 7 | 11 | 15 | 4 | 11 | 15 | 19 | 15 | 19 | 22 | 7 | 7 | 21 | | | | |
| 5.00-5.49 | | | | | | | | 8 | | | | | | 8 | 8 | 8 | 17 | 8 | 8 | 17 | 8 | 17 | 25 | 8 | 17 | 8 | 17 | 8 | 8 | 8 | 17 | 17 | 17 | 25 | 25 | 8 | 12 | | | | |
| 5.50-5.99 | 10 | 10 | | | | | | | | | | 10 | 10 | 10 | | | | 10 | | 10 | | | | | | | 10 | 10 | 10 | 30 | 10 | 20 | 10 | 10 | | 10 | | | | | |
| 6.00-6.49 | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | 30 | 30 | | 20 | 10 | 20 | | | | 20 | | 30 | 10 | 20 | 10 | 50 | 40 | 50 | 10 | 10 | | 10 | | | |
| 6.50-6.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17 | 22 | 11 | 6 | | | | 6 | | 6 | 6 | 6 | 11 | 6 | 22 | 22 | 6 | 11 | 22 | 6 | 18 | | | |
| 7.00-7.49 | | | | | | | | | | | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | | 30 | 10 | | | | | | | 10 | | 10 | 20 | | 10 | | | 20 | 10 | 30 | 70 | 30 | 20 | 10 | |
| 7.50-7.99 | | | | | | | | | | 10 | 10 | 10 | 20 | 40 | 20 | 40 | 20 | 10 | 20 | 20 | 20 | 10 | | | | | 20 | 10 | 20 | 0 | 10 | 30 | 20 | 20 | 10 | 30 | 40 | 10 | 40 | 10 | 10 |
| 8.00-8.49 | | | | | | | 8 | 15 | 31 | 23 | 62 | 77 | 85 | 85 | 85 | 85 | 69 | 62 | 54 | 38 | 38 | 31 | 23 | 38 | 31 | 23 | 31 | 23 | 15 | 31 | 8 | 31 | 15 | 23 | 8 | 15 | 15 | 8 | 38 | 13 | |
| 8.50-8.99 | 23 | 54 | 38 | 46 | 46 | 54 | 54 | 62 | 85 | 85 | 85 | 85 | 92 | 85 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 77 | 77 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 62 | 54 | 69 | 69 | 69 | 54 | 54 | 62 | 46 | 38 | 23 | 13 | | |
| 9.00-9.49 | 25 | 67 | 17 | 25 | 33 | 33 | 83 | 58 | 50 | 58 | 58 | 67 | 67 | 58 | 75 | 83 | 67 | 67 | 83 | 67 | 83 | 58 | 58 | 75 | 58 | 83 | 58 | 58 | 67 | 58 | 75 | 50 | 50 | 33 | 33 | 25 | 58 | 67 | 33 | 17 | 12 |
| 9.50-9.99 | 30 | 80 | 20 | 30 | 40 | 40 | 100 | 70 | 60 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 | 70 | 90 | 100 | 80 | 80 | 100 | 80 | 70 | 90 | 70 | 100 | 70 | 100 | 70 | 80 | 70 | 90 | 60 | 60 | 40 | 40 | 30 | 70 | 80 | 40 | 20 | 10 |

Table III-3. Incidence of melanophores on the ventral edge of the trunk (%) in the Pacific bluefin tuna. Each melanophore is recorded for the myomere on which it occurs. The number of specimens examined at each size range is shown

[illegible]

Table III-4. Incidence of melanophores on the left lateral side of the trunk (%) in the Pacific bluefin tuna. Each melanophore is recorded for the myomere on which it occurs.
The number of specimens examined at each size range is shown

| No. of myomere | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | No. of specimen | | | |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|----|--|--|
| Size range (BL, mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.50-3.99 | | | | | | | | | | 7 | 7 | 7 | 7 | 14 | 7 | 29 | 14 | 7 | 14 | 14 | 36 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.00-4.49 | | | | | | | | 4 | | | | | 11 | 4 | | | | 7 | 11 | 11 | 11 | 11 | 30 | 11 | 30 | 11 | 7 | 15 | 4 | 4 | 11 | 11 | 4 | 7 | 11 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 14 | | |
| 4.50-4.99 | | | | | | | | | | | | 5 | 5 | 5 | | | | 5 | 10 | 5 | 29 | 10 | 14 | 10 | 19 | 14 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 19 | 10 | 14 | 5 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 21 | | |
| 5.00-5.49 | | | | | | | | 8 | | | | | 8 | | | | | 8 | 8 | 8 | 17 | 8 | 17 | 8 | 8 | 8 | 33 | 8 | 8 | | 8 | 17 | 25 | 8 | 8 | | | | | | 12 | | |
| 5.50-5.99 | | | | | | | | | | | | 20 | | | | | | 20 | 10 | 40 | | | 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 40 | | 10 | 10 | 30 | 10 | | | | | 10 | | | |
| 6.00-6.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | | |
| 6.50-6.99 | | | | | | | | | | | | 6 | 0 | 6 | 6 | 6 | | 28 | 11 | | | 17 | 22 | 11 | 11 | 6 | 11 | 17 | 6 | 6 | 11 | 6 | 11 | 6 | 17 | 11 | 6 | | | 18 | | | |
| 7.00-7.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.50-7.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | 10 | 20 | | | 20 | | | | 20 | 10 | 10 | 20 | 20 | 30 | | 10 | 10 | 40 | 20 | 10 | 10 | 10 | | | |
| 8.00-8.49 | | | | | | | | | | | | | 15 | 8 | | | | 15 | 8 | 8 | 15 | 8 | 8 | 15 | 8 | 8 | 15 | 8 | 15 | 31 | 31 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 13 | | | |
| 8.50-8.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8 | 15 | 8 | 8 | 15 | 8 | 8 | 15 | 8 | 8 | 31 | 15 | 23 | 15 | 23 | 15 | 15 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 13 | | | |
| 9.00-9.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8 | | | | 17 | 17 | 8 | 8 | 17 | 17 | 25 | 25 | 42 | 58 | 33 | 50 | 33 | 50 | 33 | 33 | 50 | 42 | 12 | | | |
| 9.50-9.99 | | | | | | | | 10 | | | | | | | | | | | 10 | | | | 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 | 50 | 60 | 40 | 50 | 40 | 30 | 20 | 50 | 10 | | | | |

Table III-5. Incidence of melanophores on the right lateral side of the trunk (%) in the Pacific bluefin tuna. Each melanophore is recorded for the myomere on which it occurs.
The number of specimens examined at each size range is shown

| No. of myomere | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | No of specimen | | | | | | |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|--|--|--|--|--|--|
| Size range (BL, mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.50-3.99 | | | | | | | | | | 0 | 7 | 7 | 7 | 14 | 7 | 21 | 14 | 29 | 14 | 7 | 14 | 14 | 14 | 14 | 7 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.00-4.49 | | | | | | | | | 4 | | | | | 11 | 4 | 4 | | 11 | 4 | 15 | 11 | 11 | 4 | 30 | 19 | 7 | 15 | 7 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.50-4.99 | | | | | | | | | | | | | 5 | | | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 19 | 10 | 14 | 10 | 14 | 10 | 14 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.00-5.49 | | | | | | | | | | | | | | 17 | 8 | | | 17 | 8 | 33 | 8 | 17 | 25 | 17 | 17 | 17 | 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.50-5.99 | | | | | | | | | 10 | | | | | 20 | 10 | 10 | | 20 | 10 | 40 | | | 10 | 10 | 10 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 50 | 30 | 10 | | | | | | | | | | | |
| 6.00-6.49 | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | 10 | | 10 | 10 | 30 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | | | | | | | | | | | | |
| 6.50-6.99 | | | | | | | | | | | 6 | 6 | | 6 | 6 | 6 | | 28 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.00-7.49 | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | 10 | 20 | | 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | | | | | | | |
| 7.50-7.99 | | | | | | | | | | | | | | 10 | | 10 | | | 10 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 30 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 30 | 30 | 30 | 20 | 10 | | | | | | | |
| 8.00-8.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | 31 | | | | | | 15 | 31 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 15 | 15 | 8 | 8 | 8 | | | | | | | | | | | | |
| 8.50-8.99 | | | | | | | | | | | | | | 15 | 15 | | | | 31 | 31 | 15 | 8 | 15 | 15 | 15 | 54 | 23 | 31 | 46 | 46 | 31 | 31 | 8 | 8 | 23 | 15 | 13 | | | | | | | | | |
| 9.00-9.49 | | | | | | | | | | | | | | 8 | | | 8 | | | | | 17 | 17 | 8 | 17 | 8 | 8 | 8 | 25 | 25 | 42 | 50 | 42 | 25 | 42 | 25 | 42 | 25 | 12 | | | | | | | |
| 9.50-9.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | 10 | | | 30 | | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 30 | 30 | 40 | 50 | 50 | 30 | 20 | 50 | 10 | | | | | | |

Table III-6. Incidence of internal melanophores on the trunk (%) in the Pacific bluefin tuna. Each melanophore is recorded for the myomere on which it occurs. The number of specimens examined at each size range is shown

| No. of myomere | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | No. of specimen | | | |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|----|----|----|
| Size range (BL, mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.50-3.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 14 | | |
| 4.00-4.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 27 | | |
| 4.50-4.99 | | | | | | | | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21 | |
| 5.00-5.49 | | | | | | | | | | | | | | | 8 | | 8 | 8 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 12 | |
| 5.50-5.99 | | | | | | | | | | 10 | | | | | | | | | | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | | |
| 6.00-6.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | |
| 6.50-6.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | |
| 7.00-7.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | |
| 7.50-7.99 | | | | | | | | | 10 | 10 | | | | | | | | | | | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | |
| 8.00-8.49 | | | | | | | | | | | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 |
| 8.50-8.99 | | | | | | | | | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 15 | 23 | 31 | 15 | 23 | 23 | 31 | 31 | 10 | 10 | 10 | 10 | 30 | 20 | 30 | 20 | 10 | 30 | 20 | 20 | 30 | | | 13 |
| 9.00-9.49 | | | | | | | | | 8 | 0 | 8 | 8 | 0 | 0 | 15 | 31 | 38 | 46 | 54 | 62 | 46 | 54 | 62 | 69 | 62 | 69 | 62 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 69 | 62 | 62 | 62 | 46 | 23 | | | 13 |
| 9.50-9.99 | | | | | | | | | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 25 | 33 | 33 | 42 | 50 | 50 | 50 | 58 | 75 | 75 | 83 | 83 | 83 | 83 | 75 | 83 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 58 | 58 | 67 | 33 | | | 12 |
| | | | | | | | | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 30 | 40 | 40 | 50 | 60 | 60 | 60 | 70 | 90 | 90 | 90 | 100 | 100 | 100 | 90 | 100 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 70 | 70 | 80 | 40 | | | 10 |

Table III-7. Incidence of melanophores on the dorsal fin base (%) in the Pacific bluefin tuna. Each melanophore is recorded for the myomere on which it occurs. The number of specimens examined at each size range is shown

| No. of myomere | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | No. of specimen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Size range (BL, mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.50-3.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.00-4.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.50-4.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.00-5.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.50-5.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.00-6.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.50-6.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.00-7.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.50-7.99 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.00-8.49 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Table III-8. Incidence of melanophores on the anal fin base (%) in the Pacific bluefin tuna. Each melanophore is recorded for the myomere on which it occurs. The number of specimens examined at each size range is shown

| No. of myomere | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | No. of specimen |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|
| Size range (BL, mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.50-3.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.00-4.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.50-4.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.00-5.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.50-5.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.00-6.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.50-6.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.00-7.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.50-7.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.00-8.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.50-8.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.00-9.49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.50-9.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ている最も小さい標本は 13.55 mm BL であった。稚魚が成長するとともに明瞭なパッチが出現し、これが増加した。多くの仔魚で、黒色素胞は尾部、つまり下尾骨および尾鰭の鰭膜で見い出された。下尾骨および尾鰭鰭膜上に黒色素胞を持つ最も小さい標本はそれぞれ 6.42 および 6.81 mm BL であった。

赤色素胞 赤色素胞は躯幹部後部で、4.63 mm BL（孵化後 6 日目）で最初に出現した。34 個の赤色素胞が腹部後部の縁に、5 個の赤色素胞が躯幹部後部体側に、また 2 個の赤色素胞が躯幹部背部後部において出現した（Table III-9）。

この赤色素胞は、仔魚の成長に伴い他の部分で出現した：尾鰭鰭膜 4.75 mm BL，下顎 5.02 mm BL，下尾骨 6.96 mm BL；下尾骨および尾鰭鰭膜での赤色素胞は、それぞれ 6.92～7.20 mm BL および 4.75～7.20 mm BL の狭い範囲で観察された。下尾骨と尾鰭の鰭膜に赤色素胞を持つ最も大きな標本は 7.20 mm BL であった。背鰭と躯幹部腹部では赤色素胞はより大きくなり、そして約 7 mm より大きな仔魚ではその数が減少した。躯幹部腹部では隣接した赤色素胞は融合した。躯幹部体側では赤色素胞数は 8.5 mm BL から減少した。

魚がさらに成長すると、赤色素胞はこれらの部分から消失した。すなわち、下顎に赤色素胞を持つ最も大きな標本は 11.26 mm BL，躯幹部体側および後部背部では 15.85 mm BL，躯幹部腹部後部縁では 19.72 mm BL であった。なお、赤色素胞は上顎では観察されなかった。

その後の成長に伴って赤色素胞（特に腹部の赤色素胞）の数は減少し、いずれの赤色素胞も 20 mm BL より大きい標本では観察されなかった。

頭部棘 主な頭部棘は標本 4～7 mm BL で初めて出現した。すなわち、前鰓蓋骨偶角棘と前鰓蓋骨内縁の棘が 4.23 mm BL で（Fig. III-2D），後頭棘が 6.80 mm BL であった。前鰓蓋骨と前鰓蓋骨内縁の棘を欠く最も大きな標本は 4.48 mm BL であり、後頭棘を欠いているものは 7.21 mm BL であった（Fig. III-2E）。頭部では、他のいかなる

Table III -9. Number of erythrophores on the body of the Pacific bluefin tuna larvae and juveniles

| Body length (mm) | Dorsal notochord | Ventral notochord | Lateral notochord | Lower jaw | Hypural plate | Tail membrane |
|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------|------------------|------------------|
| 3.38 | | | | | | |
| 3.41 | | | | | | |
| 4.63 | 2 | 34 | 5 | | | |
| 4.75 | 8 | 32 | 4 | | | 1 |
| 5.02 | 4 | 2 | | | | |
| 5.09 | 4 | 36 | | | | |
| 5.11 | 3 | 54 | 4 | | | |
| 5.35 | | 24 | 4 | | | |
| 5.78 | 1 | 2 | 4 | | | |
| 6.10 | 1 | 24 | 5 | 4 | | |
| 6.72 | 3 | 1 | 6 | | | |
| 6.91 | 1 | 1 | 4 | | | |
| 6.96 | 2 | 17 | 6 | 2 | 2 | |
| 6.96 | | 1 | 8 | 3 | | |
| 7.03 | 8 | | 6 | | 1 | |
| 7.06 | 8 | 12 | 8 | 1 | 5 | 2 |
| 7.12 | | 8 | 10 | | 5 | |
| 7.20 | 6 | 8 | 6 | 1 | 3 | 1 |
| 7.92 | 1 | 8 | 6 | 1 | | |
| 8.16 | | 6 | 8 | 3 | | |
| 8.41 | 1 | 11 | 8 | 3 | | |
| 8.74 | 1 | 4 | 5 | | | |
| 8.81 | 4 | 7 | 34 | 2 | | |
| 8.92 | | 3 | 3 | 1 | | |
| 9.02 | | | | 1 | | |
| 9.35 | 3 | 12 | 5 | 3 | | |
| 9.38 | | 3 | 2 | 3 | | |
| 9.56 | | 2 | 2 | 1 | | |
| 9.60 | | 9 | 3 | 1 | | |
| 9.70 | 5 | 1 | 6 | | | |
| 9.93 | 2 | 2 | 2 | | | |
| 10.03 | | 1 | 23 | | | |
| 10.56 | 4 | 1 | 2 | 7 | | |
| 10.97 | 4 | 1 | 3 | | | |
| 11.26 | 1 | 15 | 12 | 2 | | |
| 11.71 | | | | | | |
| 12.20 | | | 4 | | | |
| 13.71 | | 5 | | | | |
| 14.00 | | | | | | |
| 14.79 | | 3 | 1 | | | |
| 14.83 | | 1 | | | | |
| 15.33 | 2 | 4 | 1 | | | |
| 15.49 | | | | | | |
| 15.85 | 1 | 3 | 2 | | | |
| 16.86 | | | | | | |
| 18.73 | | 1 | | | | |
| 19.71 | | | | | | |
| 19.72 | | 2 | | | | |
| 20.40 | | | | | | |
| 21.87 | | | | | | |
| 24.85 | | | | | | |
| 25.89 | | | | | | |
| 26.76 | | | | | | |

棘または小棘も、これより遅い発育ステージで出現しなかった。

前鰓蓋骨棘と前鰓蓋骨内縁の棘の数が、5～16 mm BL のサイズ範囲で、それぞれ5～7（最大9）および2～3（最大9）へと増加した（Fig. III-2F と 2G）。

前鰓蓋骨と前鰓蓋骨内縁の棘の数は、稚魚が 17 mm BL に達したとき減少し始めた。19.23 mm BL より大きな標本では、2つの前鰓蓋骨内縁の棘を持つ 24.00 mm BL の1つの標本を除いて、どんな前鰓蓋骨内縁の棘も観察されなかった。これらの棘が十分に発達したとき、稚魚は3つの後頭棘を持っていた。後頭棘のある最も大きな標本は 24.23 mm BL であった。調べたなかで最も大きな標本（37.78 mm BL）は、頭部に棘を持っていなかった。

歯と鱗の出現 上顎歯と下顎歯が認められた最も小さな標本は、それぞれ 5.35 および 6.32 mm BL であった。口蓋歯は 7.20 mm BL で最初に出現し、およそ 9 mm BL より大きな標本では、ほとんどのものが十分に発達した口蓋歯を持っていた。また、18.00 mm BL より大きな標本では口蓋歯を持っていなかった。

鱗のある最も小さい標本は 27.37 mm BL であった。この標本は、側線の最前部に側線鱗を持っていた。仔魚が成長すると鱗は他の場所にも出現した。すなわち、30.31 mm BL において側線の前部近傍で、30.81 mm BL において眼後部で、それぞれ出現した。鱗の出現はこの実験で調べたサイズ範囲では不完全であった。

形態異常 この実験の間にしばしば観察した形態異常は、ほとんど主鰓蓋骨と上鰓蓋骨の形成不全であった。体の1方の側にだけこの奇形を持つ標本もあれば、両方の側にそれを持つ標本もあった。これらの奇形の発生率は、本実験では正確に決定できなかったが、10%を上回ったかもしれない。

III-1-1-3. 考察

(1) 成長と発育

クロマグロの形態発育を Fig. III-6 で要約した。クロマグロの初期発育ステージでの速い成長は、日本で他の代表的な海の養殖魚であるマダイおよびシマアジと比較すると明らかである（Fig. III-7）。なお、これら2種の成長は、本実験のクロマグロとほぼ同じ温度で飼育された結果である（澤田未発表）。成長における違いは、孵化後 20 日目以前で明白であり、孵化後 20 日目（平均 9.34 mm BL）以後、仔魚が稚魚に変態し始めたとき以降いっそう顕著であった。

代田¹⁶¹⁾は、19種の仔稚魚の摂餌開始期および 10, 15, 20 mm TL における口サイズを調べ、口サイズが大きいほど成長が速いと結論した。孵化後 19 日目（平均 10.17 mm TL）では、代田の計算に従ったクロマグロの口サイズ（口サイズ = 上顎長 $\times 2^{0.5}$ ）は平均 2.54 mm であった。これは、10 mm TL では、キハダ（3.3 mm）、カツオ（3.0 mm）、ブリ（2.1 mm）とともに最も大きなサイズグループに属する¹⁶¹⁾。これらの結果は、クロマグロの口サイズ変化と代田によって提案された仮説によく当てはまる。加えて、Richards and Dove¹⁶²⁾ および Miyashita et al.¹⁵⁵⁾ は、クロマグロの消化器系が他の魚より早く発達し、稚魚期の初期に成魚のそれに達するというを示した。これは、クロマグロが発育初期から能率的に餌を利用でき、その効率は後屈曲ステージ後に大いに改善されることを意味している。

クロマグロの顎歯の初めての出現（5.35 mm BL）は、マサバ¹⁶³⁾とほぼ同じサイズ（5.15 mm BL）であり、他魚種より大きかった。例えば、マダイ（4.40 mm BL）¹⁶⁴⁾、アカメ、*Lates calcarifer*

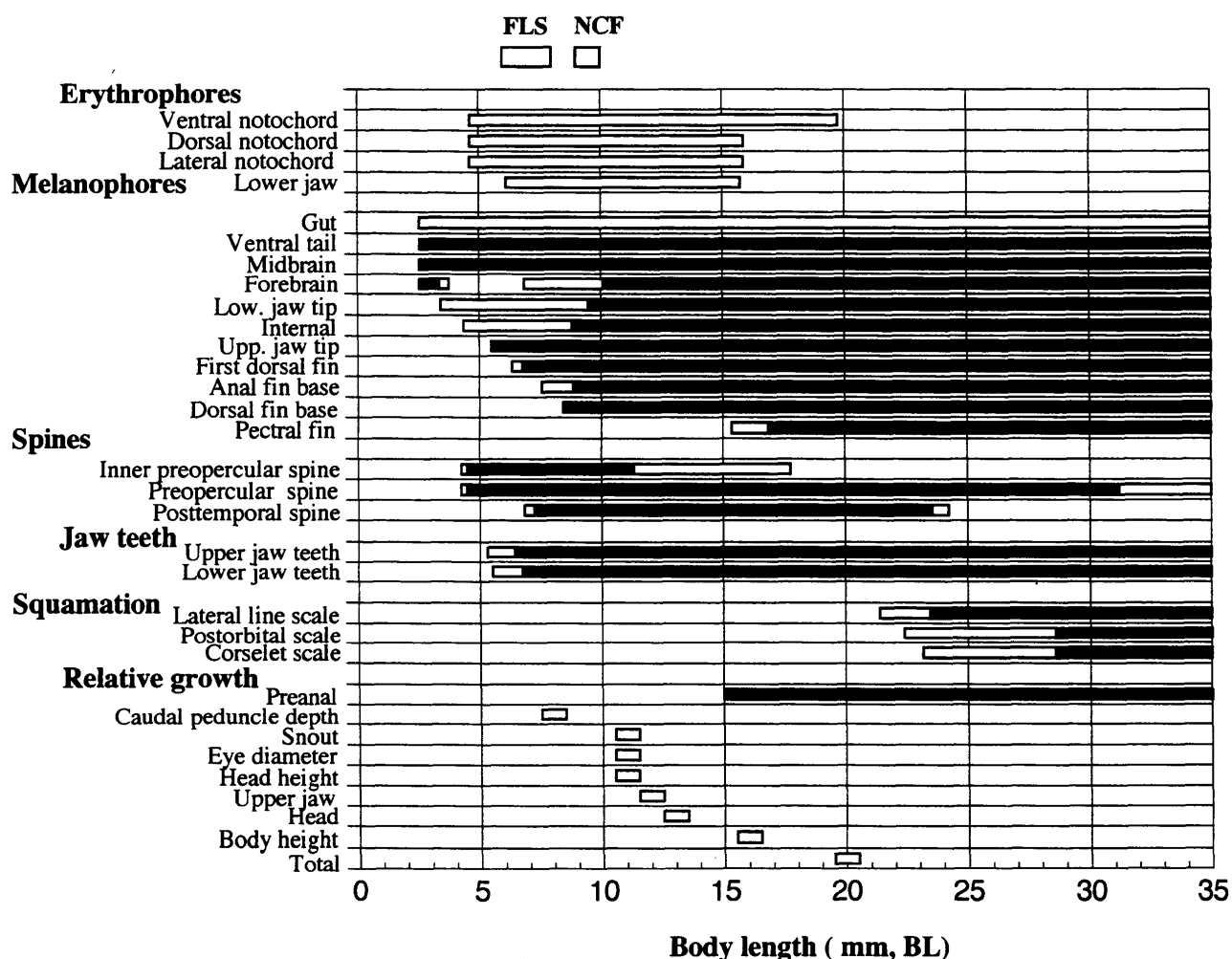


Fig. III-6. Schematic representation of the development of pigment, spines, teeth, squamation, and relative growth (length of body parts in relation to body length) in hatchery-reared Pacific bluefin tuna, *T. thynnus orientalis*. Flexion larva subdivision (FLS) and numerical complement of fin-rays (NCF) are also shown. Appearance of pigment and spines subject to individual variation (□). Pigment and spines present in all specimens examined (■). In relative growth, the peak value of body part proportion (relative to BL) (□) and the attainment of a constant value of body part proportion (relative to BL) (■).

(2.62 mm TL)¹⁶⁵⁾, ブリ (4.6 mm BL)¹⁶⁶⁾ である。また、顎歯の出現サイズがクロマグロより大きい魚種は、クエ, *Epinephelus bruneus* (6.01 mm BL)¹⁶⁷⁾, キジハタ (6.8 mm BL)¹⁶⁸⁾ である。

顎歯の発育は、摂餌能力と密接に関連があるとみなされる。しかし、クロマグロの初期成長は孵化後 10 日目まで、マダイに比べて遅くなかった (Fig. III-6)。このことは、孵化後 10 日目までのクロマグロが吸引によって摂餌し、捕食に顎歯を必要としないことを意味する。

口蓋歯は、屈曲ステージの 7 mm BL で発達し始め、十分に発達した歯は、後屈曲ステージの 9 mm BL で観察された。7 mm BL で、クロマグロ 仔魚は他の魚種の仔魚を摂餌した。そして、8 mm BL の 後屈曲ステージから共喰いが観察された。口蓋歯は、餌を捕食する際に顎歯を補助するとみなされている。口蓋歯の出現と発育は、クロマグロ仔魚の魚食性の出現と、上述の後屈曲ステージからの速い成長に対応していた。

飼育技術改善を目的として、初期生活史を一層良く理解するために、初期発育における摂餌モードと成長の関係に関する情報をもっと得ることが重要である。これを行なうためには、クロマグロの摂餌に関係する骨要素の形態と発育をさらに研究すること、例えば マサバ¹⁶³⁾ およびアカ

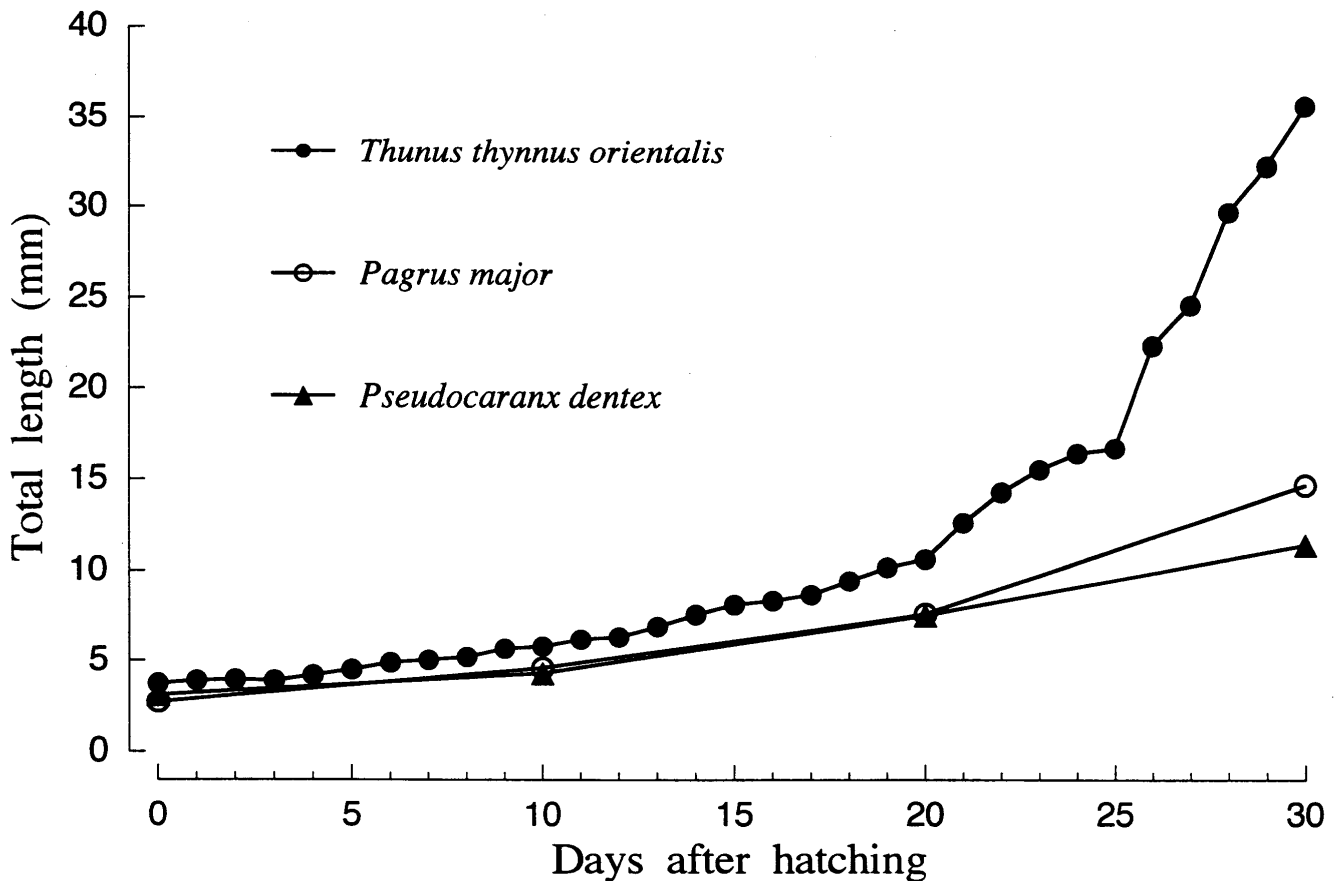


Fig. III-7. Growth of the Pacific bluefin tuna, *T. thynnus orientalis*, red sea bream, *Pagrus major*, and striped jack, *Pseudocaranx dentex*. Red sea bream and striped jack were reared at the same temperature range (24-27 °C) as Pacific bluefin tuna.

メ¹⁶⁵⁾の初期発育で行われたような研究や、初期発育における摂餌行動の観察が必要である。

クロマグロ頭部の各部は、発育ステージの初期から著しい優成長を示し、特に上顎長の体長に対する比率はマダイ⁷⁴⁾やカンパチ^{104, 105)}などに比べて大きかった (Fig. III-3)。加えて、頭部は尾柄高以外の体各部、たとえば、全長や体高が示したより小さなサイズで、体長に対して最大比率に達した (Fig. III-5)。クロマグロの成長戦略は、より大きな生物の摂餌を可能にするために、初期ステージにおいて、他の器官より前に摂餌器官を発達させることにある。また、シマアジ¹⁶⁹⁾、イサキ、*Parapristipoma trilineatum*¹⁷⁰⁾、アユ、*Plecoglossus altivelis*¹⁷¹⁾などの体各部のアロメトリーがそれぞれ、2~3相、2~4相および2~4相であるのに対して、クロマグロでは4~5相を呈することからも、その発育様式が複雑であることが窺われる。

クロマグロの相対成長のもう1つの特徴は、肛門の体後部への移動である。最初体前部に位置した肛門は、屈曲ステージの終わりには体の中央に、その後、体後部に位置した (Fig. III-3)。

Kaji et al.³⁵⁾は3~14 mm BLまでのクロマグロ仔魚の相対成長を調べ、肛門前長を除いて、体各部が10 mm BLに達した後に一定の相対成長を示したと報告している。しかし本実験の結果は、10 mm BLにおいて体各部が体長に対して一定の比率に達していない。この相違は、Kaji et al.³⁵⁾の研究において、より大きなサイズの標本数が不十分であることに因るのかもしれない。稚魚期においても、少数を除いて、体長に対する体各部の長さの比率が徐々に減少した (Fig. III-3)。従って、稚魚期のクロマグロのプロポーシオンは、成魚のそれと異なっているはずである。

(2) 色素胞分布

マグロ属仔魚を正確に同定するためには、黒色素胞と赤色素胞の分布パターンにおける個体差、成長に伴う変化、地理的な変化についての広い知見を必要とする。本研究によって、これらのパターンの個体差および成長に伴う変化に関する知見を得た。

クロマグロ仔稚魚の黒色素胞分布パターンは、発育に伴って4つの特徴的な期間を示した。それは、孵化仔魚、孵化後1から3日目、前屈曲から後屈曲、そして稚魚期である。クロマグロはクッパー 胞の出現期から卵ステージで黒色素胞を持っている⁷⁾。孵化仔魚には、膜鰭以外の体全体にこのタイプの黒色素胞が認められた。

前屈曲ステージ (3.8~8 mm BL) からの仔魚は、仔魚期の黒色素胞だけを持っていた。稚魚期の黒色素胞が出現し始めたのは、後屈曲ステージ (8~10 mm BL) からであった。すなわち、軀幹部 (Table III-2~8)、前脳、主上顎骨、鎖骨縫合、眼周囲 (Fig. III-2F) において黒色素胞が出現し、次第に大きくなった。10 mm BL で仔魚は稚魚に移行し、全ての稚魚期の黒色素胞を持つようになった。

本研究では、軀幹部背部と腹部、体側部と内部の黒色素胞の間に有意な相関を認めた (Fig. III-8, Spearman ランク相関関係テスト ($p < 0.01$)). しかし、大西洋のクロマグロ仔魚を調べた Richards and Potthoff¹⁵³⁾ と Kohno et al.¹⁵⁴⁾ は、これらの間に黒色素胞の関係は見いだされなかったと報告している。この相違は、*T. thynnus orientalis* と *T. thynnus thynnus* の間の亜種レベルの相違あるいは、それらの研究において 6.0 mm BL より大きな標本の不十分な数によるものかもしれない。これらの黒色素胞の数は成長と共に増加した (Table III-2~6)。本研究においても、少ない数の範囲で関係が明らかであったという訳ではない (Fig. III-8)。加えて、地中海クロマグロ仔魚では、3.99 mm BL より小さなサイズにおいての内部黒色素胞を持っていた¹⁵⁴⁾。対照的に、本実験では総ての標本において、4.49 mm BL まで軀幹部の内部黒色素胞を観察しなかった。これは亜種レベルの相違として説明されるかもしれない。

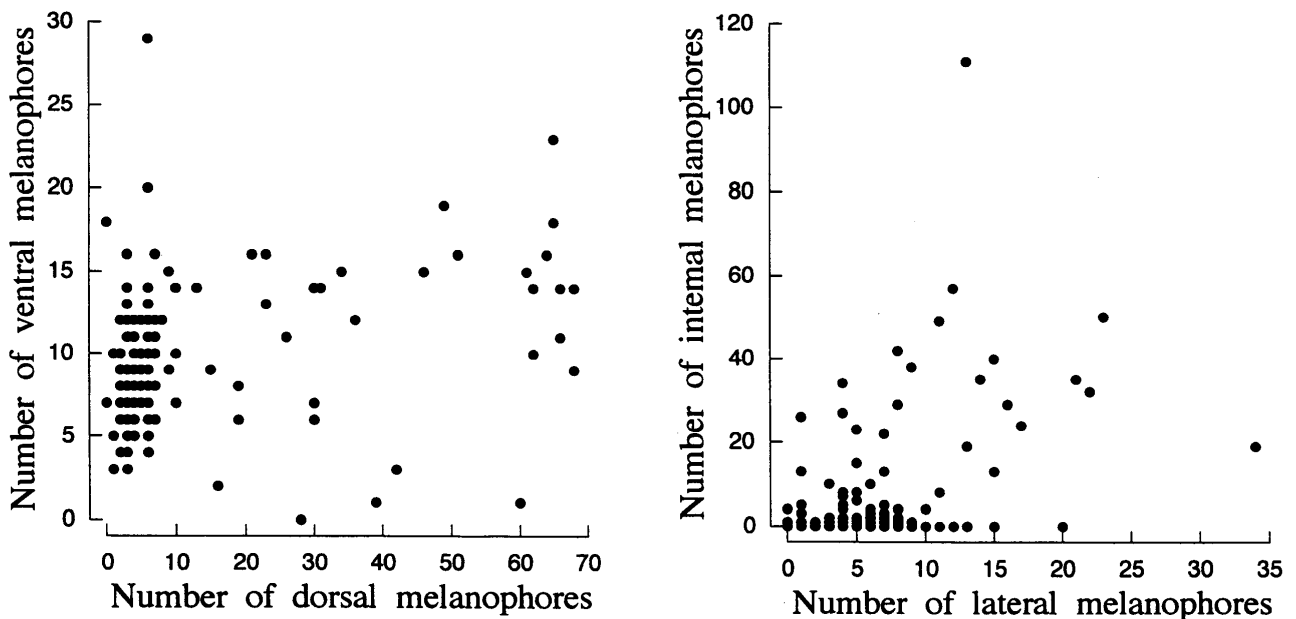


Fig. III-8. Relation of the number of dorsal and ventral melanophores (left figure) and the numbers of lateral and internal melanophores (right figure) in larval the Pacific bluefin tuna.

西川¹⁷²⁾は太平洋クロマグロ仔魚(3.15~8.20 mm BL)で躯幹部黒色素胞を調べ、非常に多くの場合、仔魚が背部および腹部に2つずつの黒色素胞を持っていたと報告した。このパターンは、地中海産 *T. thynnus thynnus* 仔魚のそれに似ている(2.53~5.25 mm BL)¹⁵⁴⁾。しかし、本実験の標本においては、同じサイズ範囲で、これらの黒色素胞はより多く出現した(Table III-2 および 3)。加えて、西川¹⁷²⁾は、本実験の観察結果より早い時期での背鰭の黒色素胞の出現について報告した。しかしながら、上顎および下顎における出現は、両方の研究において同じサイズ範囲で認められた。西川によって調べられた標本は本研究と同じ個体群に属する。それゆえ、仔魚期の色素胞分布におけるこれらの相違が個体群の相違によったとは考えられない。

飼育魚の仔魚は、野生のものより多数の色素胞を持っていることが、しばしば示されてきた。例えばマダイ¹⁷³⁾、ヘダイ、*Sparus sarba*¹⁷⁴⁾、イサキ¹⁷⁵⁾、ニベ¹⁷⁶⁾である。従って、飼育かあるいは野生かといった異なる標本起源が、この研究と彼の研究の間の仔魚期の色素胞分布における相違を説明するかもしれない。

Kohno et al.¹⁵⁴⁾は下顎および躯幹部の黒色素胞の出現における僅かな相違を、3つの場所、すなわち、地中海¹⁵⁴⁾、大西洋¹⁵³⁾、太平洋¹⁵²⁾から得られたクロマグロの間で報告した。これらの結果によると、下顎の黒色素胞は、3.0 mm BL より大きな総ての太平洋産標本で、また、4.0 mm BL より大きな総ての大西洋産標本で出現した。我々の標本でのこれら黒色素胞の発現率は、3.50~3.99 mm BL において 7.1%、4.00~4.49 mm BL で 29.6%、4.50~4.99 mm BL で 57.1%、5.00~5.49 mm BL で 83.3%、5.50 mm より大きな標本で 90%以上であった。そして、これらの黒色素胞を欠いている最も大きな標本は 9.46 mm BL であった。これは、地中海からの標本に似ている。太平洋のクロマグロは広い分布エリアを持っているので、本実験の標本と Matsumoto et al.¹⁵²⁾の標本間の下顎黒色素胞分布の相違は、太平洋クロマグロの黒色素胞パターンの地理的変異によって起こったかもしれない。この点を確かめるためにはなお一層の研究が必要とされる。

上柳¹⁵⁹⁾は、太平洋産のマグロ属仔魚の赤色素胞の分布を調べ、赤色素胞分布の種特異性を以下のように報告した。ビンナガの仔魚は、キハダの仔魚より多くの赤色素胞を躯幹部背縁および尾柄部前部に常に持っており、キハダでは尾柄部の赤色素胞は1つまたは2つであった。クロマグロとメバチ仔魚の赤色素胞パターンは、ビンナガとキハダの中間的な特徴を示したという。

本研究で観察されたクロマグロの赤色素胞分布パターンは、上柳¹⁶⁰⁾によって報告されたそれとおおよそは合致した。しかし、1個体の背部赤色素胞の数の範囲は、上柳¹⁵⁹⁾の結果(1~5)に比べて本研究(0~8)で幾分広かった。Matsumoto et al.¹⁵²⁾はハワイ近海の仔魚を調べ、マグロ類仔魚の同定に赤色素胞パターンが形態上の特徴として役立つことに同意した。しかし、この可能性を確かめるために、野生と飼育の標本間の、他のマグロ属仔稚魚における赤色素胞パターンの相違を調べる必要がある。種々のマグロ属仔魚期の飼育が精力的に試みられているので、これは可能かもしれない。

下尾骨と尾鰭鰭膜における赤色素胞が、前屈曲と屈曲ステージの狭いサイズ範囲で観察された。また、下顎下側での赤色素胞は稚魚期初期のステージまで観察された。

腹面の黒色素胞は、前屈曲ステージ(4.63~6.10 mm BL)で多数(少なくとも20個)出現した。

クロマグロは、孵化から前屈曲ステージまで黄色素胞を持っていなかった。キハダ^{25, 24)}およびメバチ¹¹⁰⁾では、それぞれ背鰭と腹鰭の鰭膜および躯幹部背部に黄色素胞の一団を持っている。

従って、黄色素胞パターンは、前屈曲ステージでこれらの種を見分けることのために使用することができる。

(3) 形態異常と生残率

シマアジ、ヒラメといった人工孵化魚で起きるような主鰓蓋骨および下鰓蓋骨の奇形は、本実験で観察した飼育魚でも認められた。この奇形の原因は未知であるが、これらの魚にとって致命的ではない。

クロマグロの初期発育ステージにおける高い死亡率は、種苗生産の障害となっている。孵化後10日目までの生残率は一般に10~40%である。不適当なサイズ、質、量の餌が、この初期減耗として考えられる原因である。クロマグロ仔魚の上顎長は、仔魚が摂餌を始めた孵化後3日目の0.35 mmから、10日目の0.68 mmまで急激に伸張した。これは、この期間に口サイズが急速に増加することを示している。野生のクロマグロ仔魚は、4~5 mm TLにおいて、サイズの小さなコペポダノープリウスから *Corycaeus* のコペポディドあるいは成体に餌を変えると報告されている¹⁷⁹⁾。そして、これは本研究における孵化後3~7日目(3.7~4.8 mm BL)に相当する。

本実験の餌料系列では、孵化後10日目まで同サイズ組成のワムシを使用した。この期間の野生の仔魚の食性の変化と口サイズの急速な増加を考慮すると、ワムシサイズを変えるか、培養したカイアシ類^{178, 179)}のような餌料に替えることが、10日齢までのクロマグロ仔魚の生残率を高めるために有効かもしれない。孵化後10日目までの初期減耗の後、孵化後15日目頃からの共喰いが、本研究における減耗の原因となった。この減耗が原因で、初期飼育におけるクロマグロの生残率は一般的に低く10%以下となる。メバチ¹¹⁰⁾やキハダ^{24, 25)}のような他のマグロ類の種苗生産も過去に試みられているが、同じ理由でまだ成功していない。これらマグロ類の種苗生産技術確立のためには、初期発育ステージの飼育技術を改善する必要がある。

Ⅲ-1-2. 稚魚期から若魚期¹⁸⁰⁾

クロマグロの種苗生産過程における第3の減耗期、すなわち、稚魚から若魚期にかけて頻発する衝突死は、種苗を量産する上で解決しなければならない最大の課題である。この防除対策を検討するためには、クロマグロの成長に伴って変化する生理生態学的特性を、発育段階毎に把握する必要がある。しかし、稚魚期以降の発育過程に関する研究は、クロマグロは勿論のこと他魚種についても著しく少ない。そこで、衝突死防除対策の基礎知見集積の一環として、稚魚期以降の成長に伴う外部形態の変化を観察するとともに、相対成長の解析を行った。

Ⅲ-1-2-1. 材料および方法

(1) 供試魚

飼育に供試した受精卵は、1995年7月29日に近畿大学水産研究所大島分室で、養成8歳クロマグロの生簀内自然産卵によって得た165万粒である。採集した卵はポリエチレン袋に海水と共に収容し、発泡スチロール箱に収納して自動車で水産養殖種苗センター白浜事業場まで約2時間を要して輸送した。輸送時の水温は約24℃で、ポリエチレン袋に入れたまま数分間馴致した後、水温27℃の飼育水槽内へ収容した。飼育水槽は、コンクリート製の角形20 m³容水槽2面および角形100 m³容水槽1面である。

飼育水は孵化後 5 日目まで止水としたが、以後徐々に流水とし、孵化後 10 日目までは微細藻類ナノクロロプシス、*Nannochloropsis oculata* を 50×10^4 cells/ml の濃度になるように添加した。水温はチラーを用いて卵収容時の約 27℃ から徐々に低下させ、孵化後 5 日目以後は 24～25℃ に保った。孵化後 20 日目以降の水温は、外海水温の上昇と注水量の増加に伴って上昇したので常温とし、8 月 26～28 日（孵化後 27～29 日目）に最高水温 28.8℃ を記録した（Fig. III-9）。9 月以降の水温は 20℃ 前後まで徐々に低下した。なお、100 m³ 容水槽における注水量は、孵化後 126 日目の 29.25 m³/h まで徐々に増加させた。

孵化後 10 日目頃から共喰いが始まり日毎に激しくなったため、孵化後 17～21 日目にかけて、水面近くに浮いてくる小型個体を掬い採り別の水槽に分養した。また、孵化後 20 日目頃から魚の水槽壁面への衝突による死亡が認められるようになり、次第に激しくなったため、水槽側面への衝突時の衝撃緩和対策として、孵化後 24 日目にコンクリート水槽内に設置したポリビニールシート製生簀に稚魚を移し替えた。このシート生簀は青色で、底面中央に目合 9 mm の排水用モジ網を張ったもので、コンクリート水槽の側面および底面との隙間が 10～30 cm を保つように固定した。注水はシート生簀の内側に入れ、コンクリート水槽の底面中央の排水口から排水した。

飼育餌料は、ワムシを孵化後 2 から 22 日目、アルテミアのノープリウスを同 11 から 27 日目まで、孵化仔魚を同 12 から 30 日目まで、総合ビタミン剤を添加したイカナゴを同 26 日目からそれぞれ与えた。従って、孵化後 30 日目以後の餌料は主にイカナゴで、クロマグロの成長に伴って、ミンチ、切断肉、あるいは丸のままで与えた（Fig. III-9）。

（2）測定および観察方法

卵は 7 月 30 日に孵化した。孵化後日数は孵化当日を 0 日齢として数えた。孵化後 25 日目までの測定用サンプリングは、生存魚の中から任意に 10 尾を取り上げたが、供試魚は孵化後 10 日目に 121,500 尾まで急減した後、共喰いによる減耗、さらには水槽側面への衝突による減耗によって生残尾数の減少が続いたので、以後のサンプリングは死亡個体とした。この死亡魚は、ほとんどが水槽側面への衝突によるものと思われ、大きさに偏りが無いことから成長の解析に供して支障ないものと判断した。

飼育期間中の全測定魚の大きさを全長で Fig. III-9 に示したが、相対成長の解析は体長を基準とするので、全長に対する体長、尾叉長および体重の関係を Fig. III-10 に示した。相対成長解析用サンプルの採集は、孵化後 29 日目から開始した。供試魚の取り上げは、朝、昼、夕の日に 3 回、あるいは死亡魚を発見次第随時行い、取り上げた後、直ちに -30℃ の冷凍庫で急速冷凍した。その結果、全長 25.4 mm、体重 0.1 g の最小個体から全長 367.9 mm、体重 864 g（孵化後 118 日目）の最大個体まで、合計 1,264 尾の供試魚を得た。

測定は、冷凍保存したサンプルを自然解凍し、魚体に定規を沿わせてビデオカメラ（SONY 社製 Handycam および Panasonic 社製ブレンビー）で撮影した画像をパーソナルコンピューターに取り込んだ後、前節（仔魚期～稚魚期）と同じ方法で各部を測定した。測定部位は、全長（TL）、尾叉長（FL）、体長（BL）、肛門前長（PL）、体高（BH）、頭長（HL）、頭高（HH）、吻長（SnL）、眼径（ED）、上顎長（UJL）、尾柄高（CPD）および体重（BW）の 11 部位、12 項目とした。なお、体重の測定には電子天秤を用いた。

外部形態の観察は、測定魚の中でもとりわけ保存状態の良いものを用い、体長 31.3、69.8、

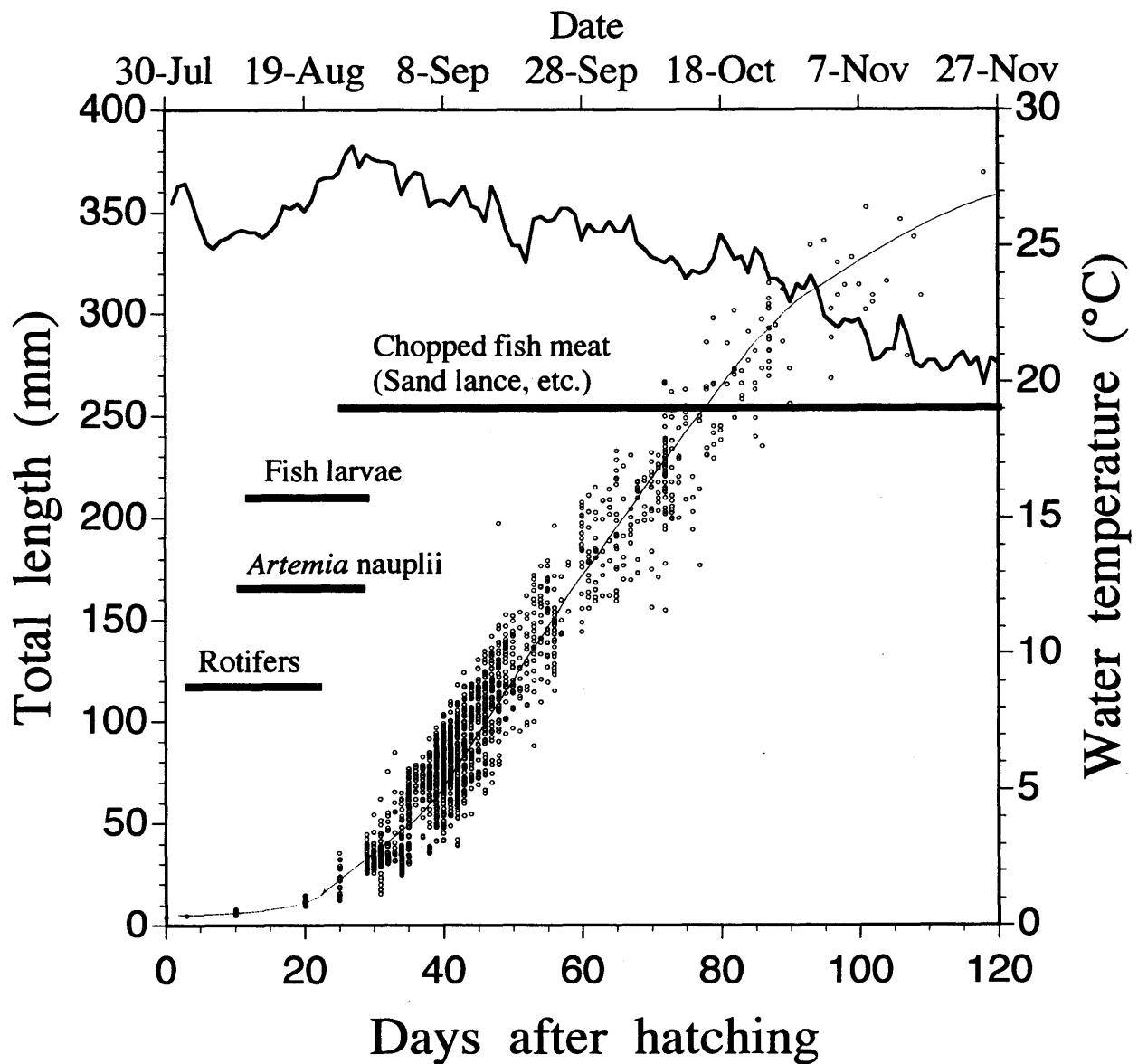


Fig. III-9. Growth and feeding schedule of the Pacific bluefin tuna (1995).

78.4, 91.8, 101.8, 149.9 および 205.4 mm の個体について、目視、写真撮影およびスケッチによって行った。

(3) 相対成長の解析

相対成長の解析方法は前節（仔魚期～稚魚期）と同様である。

Ⅲ-1-2-2. 結果

(1) 絶対成長

Fig. III-9 に示したように、孵化直後 3.8 mm であった平均全長は、孵化後 10 日目、 5.62 ± 0.84 mm；同 20 日目、 11.43 ± 1.81 mm と、孵化後 20 日目頃までの成長は緩やかであったが、以後著しく速くなった。

すなわち、それ以後から相対成長の解析のためのサンプリングを行ったが、その測定個体の平

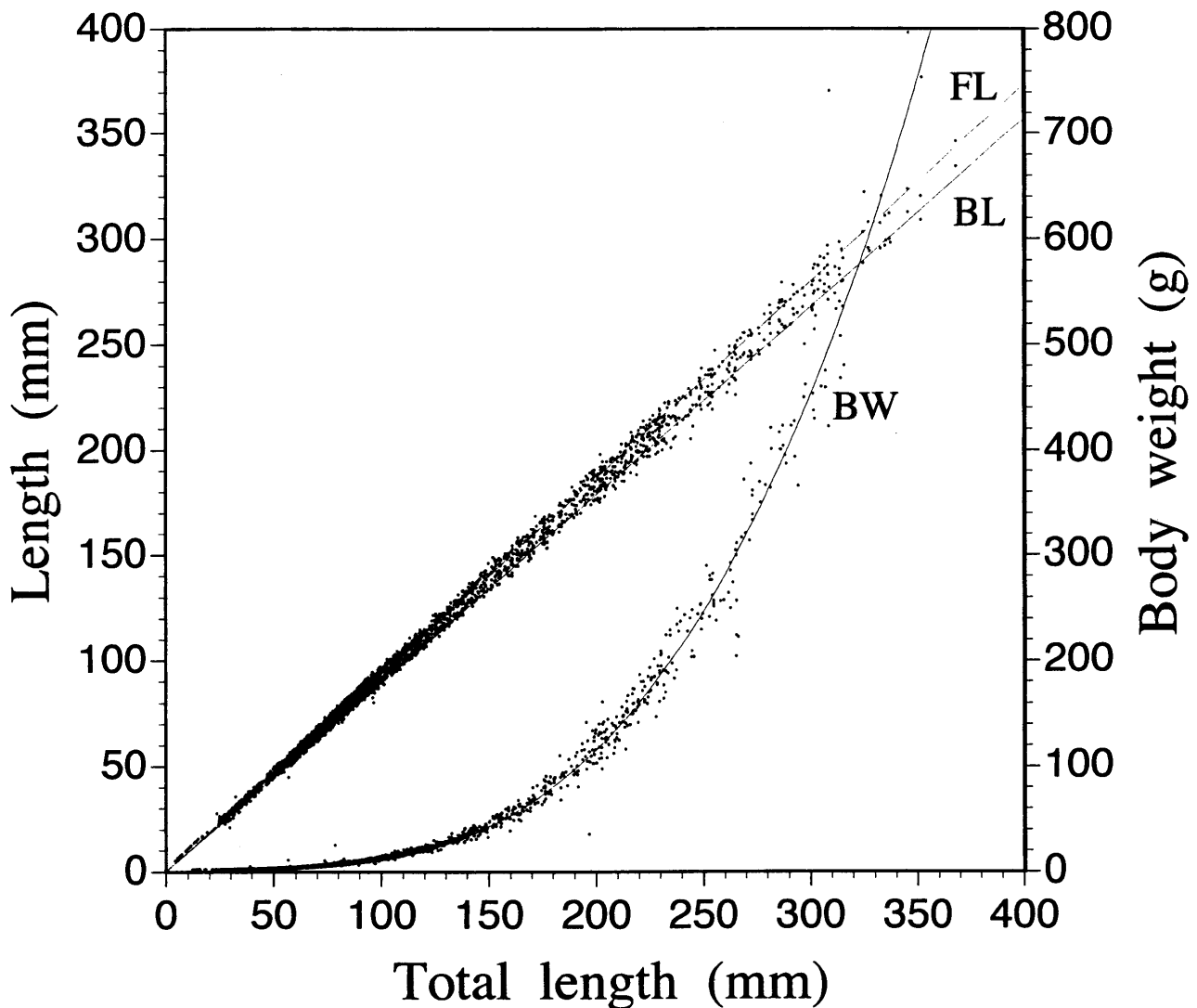


Fig. III-10. Relationship between total length and fork length, body length and body weight of the Pacific bluefin tuna. FL, fork length; BL, body length; BW; body weight.

均全長と平均体重は、それぞれ、孵化後 29 日目、 32.5 ± 6.1 mm, 0.27 ± 0.2 g ; 同 40 日目、 77.8 ± 13.6 mm, 5.38 ± 2.7 g ; 同 60 日目、 194.5 ± 9.2 mm, 87.6 ± 27.8 g ; 同 80 日目、 244.2 ± 6.9 mm, 240.2 ± 31.4 g と、極めて速い成長を示した (Table III-10)。水温が 22℃以下となった 11 月初旬 (孵化後 100 日目頃) からの成長率は低下した。

(2) 相対成長

成長に伴う体長に対する魚体各部の長さの比の変化を Fig. III-11 および 12 に示した。また、さらに大きなサイズでの相対成長を検討するために、天然産幼魚から養成中の未成魚および成魚 (1,000 mm BL 以上) についての、頭高以外の各部位における比を求めて同図内にプロットした。

全長、尾叉長、肛門前長、頭長および上顎長の体長に対する比は、測定開始時 (孵化後 29 日目、BL= 28.35 ± 4.99 mm) にはそれぞれ、114, 107, 64, 37 および 19%であったが、100 mm BL でそれぞれ 111, 104, 63, 28 および 11% まで徐々に減少し、その後ほぼ一定となった。

吻長の体長に対する比率は測定開始時に 9%であったが、100 mm BL の 6%まで徐々に減少し、

Table III-10. Growth of the Pacific bluefin tuna

| Days after hatching | Total length (mm) | | | Body weight (g) | No. of fish |
|---------------------|--------------------|--------|--------|--------------------|-------------|
| | Mean \pm S.D. | Max. | Min. | | |
| 0 | | | | | |
| 10 | 5.62 \pm 0.84 | 7.16 | 4.19 | — | 10 |
| 20 | 11.43 \pm 1.81 | 13.81 | 8.79 | — | 10 |
| 29 | 32.53 \pm 6.06 | 41.58 | 25.35 | 0.27 \pm 0.20 | 7 |
| 40 | 77.84 \pm 13.61 | 102.46 | 40.85 | 5.38 \pm 2.74 | 125 |
| 50 | 140.05 \pm 9.24 | 151.11 | 95.60 | 24.51 \pm 9.37 | 20 |
| 60 | 194.51 \pm 9.20 | 206.71 | 143.51 | 87.61 \pm 27.82 | 20 |
| 70 | 216.20 \pm 12.46 | 230.84 | 155.31 | 136.92 \pm 44.16 | 12 |
| 80 | 244.20 \pm 6.87 | 253.6 | 237.29 | 240.2 \pm 31.36 | 4 |
| 90 | 263.82 | 272.42 | 255.22 | 286.3 | 2 |
| 100 | 309.77 | 313.37 | 309.17 | 489.5 | 2 |
| 109 | 307.84 | 307.84 | — | 420 | 1 |
| 118 | 367.94 | 367.94 | — | 864 | 1 |
| 126 | 351.35 | 371.18 | 331.53 | 690 | 2 |

その後、343.5 mm BL の 7%まで漸増した。眼径の体長に対する比率は測定開始時に 11%であったが、80 mm BL の 7%まで徐々に減少した後、120 mm BL 前後までほぼ一定となり、以後、343.5 mm BL の 4.5%まで徐々に減少した。頭高および体高の体長に対する比率は、測定開始時のそれぞれ 23 および 24%から、90 mm BL 前後までほぼ一定であったが、その後は、200 mm BL 前後のそれぞれ、26 および 31%まで増加した後、ほぼ一定になった。なお、尾柄高の体長に対する比率は 3%前後を示し、成長に伴う変化は認められなかった。

本実験で測定した最大の個体 (343.5 mm BL) における体各部位の体長に対する比率を、天然産の養成未成魚または成魚のそれらと比較したところ、眼径を除いたすべての部位でほぼ近い数値を示した (Fig. III-11, 12)。

また、体長に対する肥満度の変動をみると、80 mm BL 付近の 17 前後まで顕著に増大し、その後 250 mm BL 付近の 23 前後まで増加して成魚のそれと同水準に達した (Fig. III-13)。

本研究では、23.5 mm BL から 343.5 mm BL までの相対成長が得られた。この範囲における魚体各部の長さの体長に対する相対成長をアロメトリー式に回帰し、Table III-11 ならびに Fig. III-14 に示した。全長、尾叉長および肛門前長は、いずれも終始等成長を示したが、それぞれ 80, 80, および 90 mm BL に成長屈折点が認められた。体重は終始優成長を示し、110 mm BL に屈折点が認められた。頭長、吻長および上顎長では、それぞれ 80, 100 および 150 mm BL に 1 つの成長屈折点が認められ、それまではいずれも劣成長であったが、頭長および上顎長が等成長に、吻長が優成長にそれぞれ移行した。頭高は 80 mm に成長屈折点が認められ、等成長から優成長に移行した。眼径では終始劣成長を示したが、80 mm BL に成長屈折点が認められた。

以上の 9 部位での成長屈折点がいずれも 1 ヶ所であったのに対して、体高および尾柄高では、それぞれ 150, 200 および 110, 200 mm BL の 2 ヶ所に成長屈折点が認められた。前者では 150 mm BL で等成長から優成長に移行した後 200 mm BL で再び等成長に転じたが、後者では、200 mm

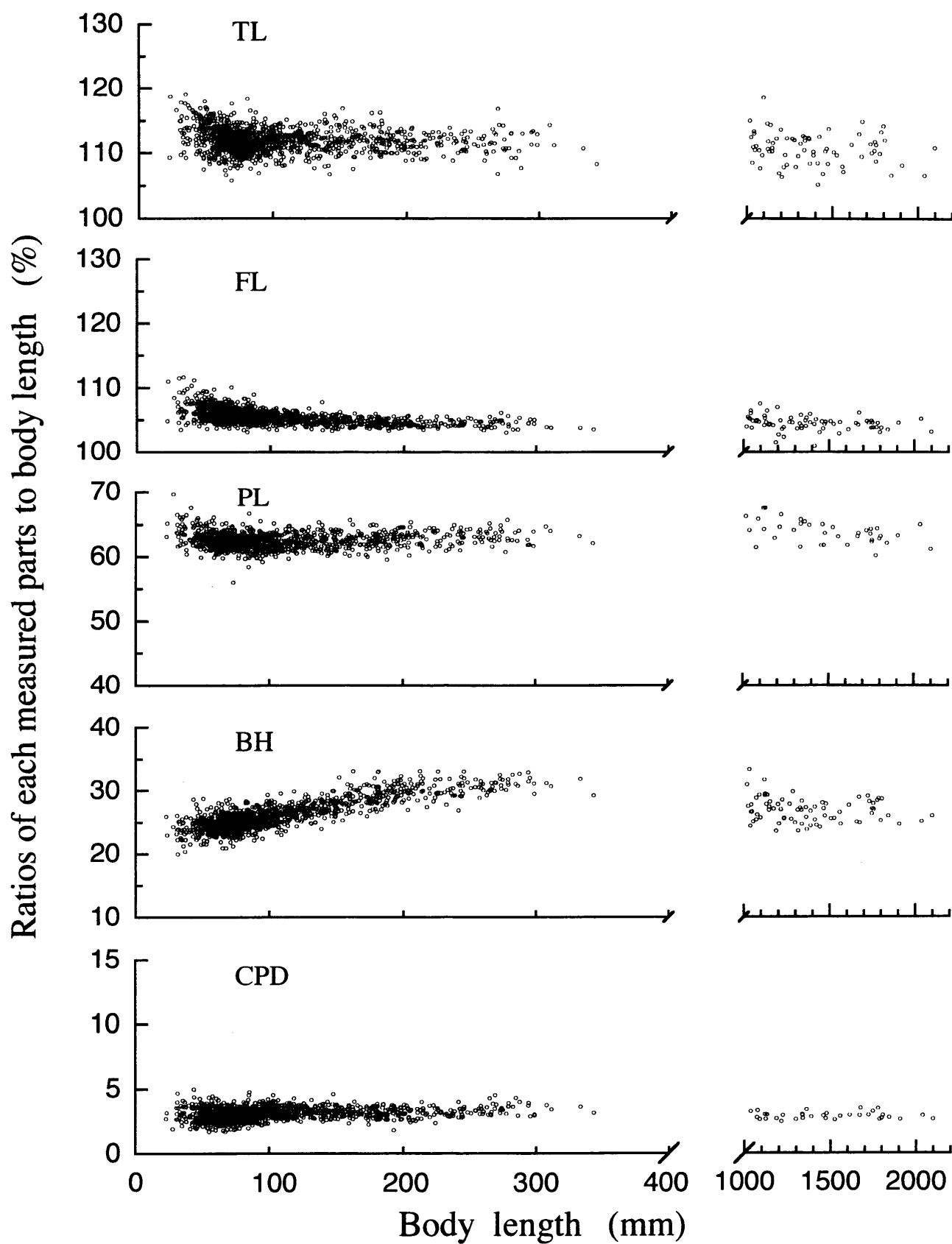


Fig. III-11. Changes of the ratio of each body parts in relation to body length in the Pacific bluefin tuna after juvenile stage. Specimens >1,000 mm BL were wild-caught and raised. TL, total length; FL, fork length; PL, preanal length; BH, body height; CPD, caudal peduncle depth.

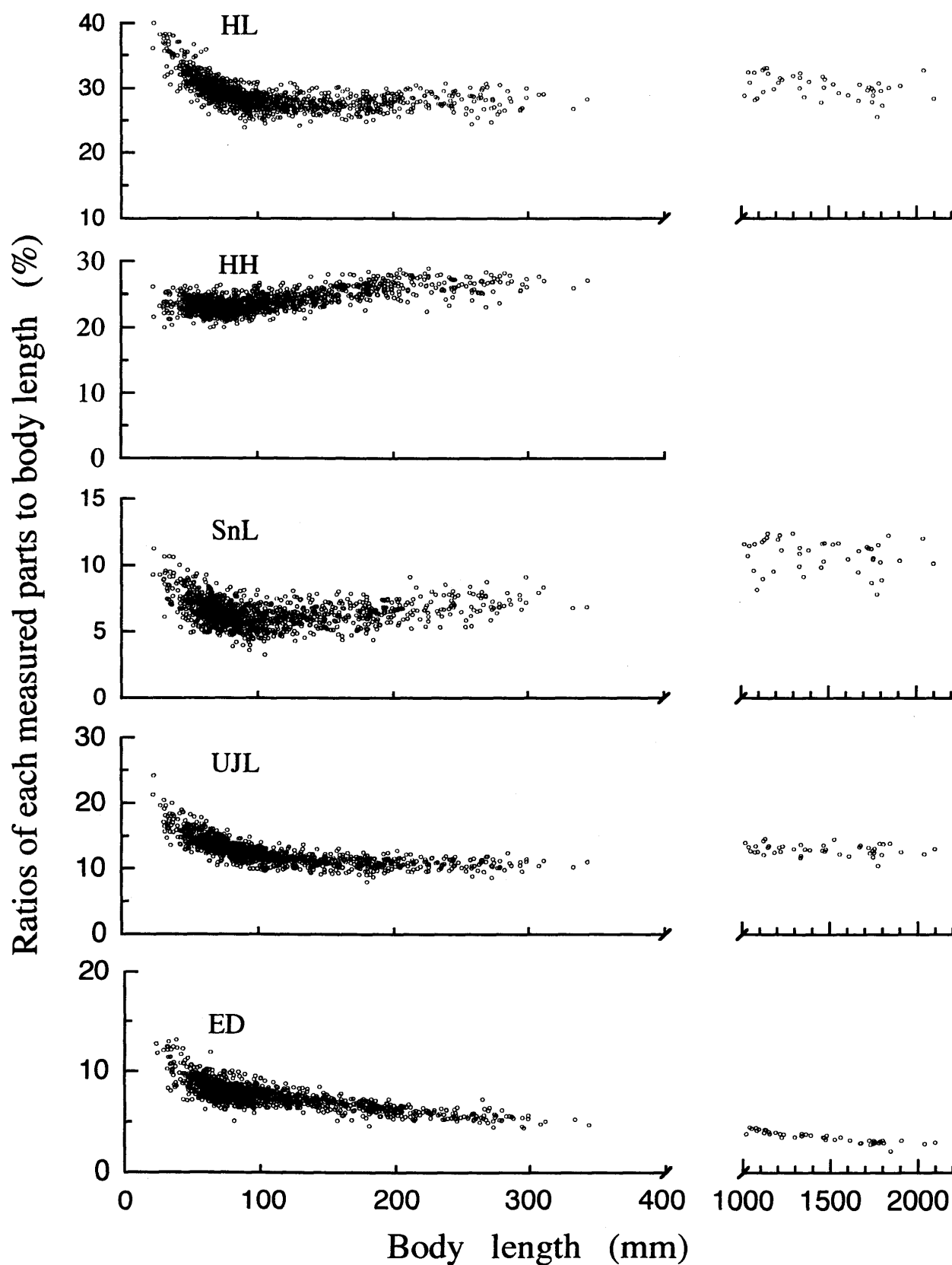


Fig. III-12. Changes of the ratio of each body parts in relation to body length in the Pacific bluefin tuna after juvenile stage. Specimens >1,000 mm BL were wild-caught and raised. HH, head height; HL, head length; SnL, snout length; UJL, upper jaw length; ED, eye diameter.

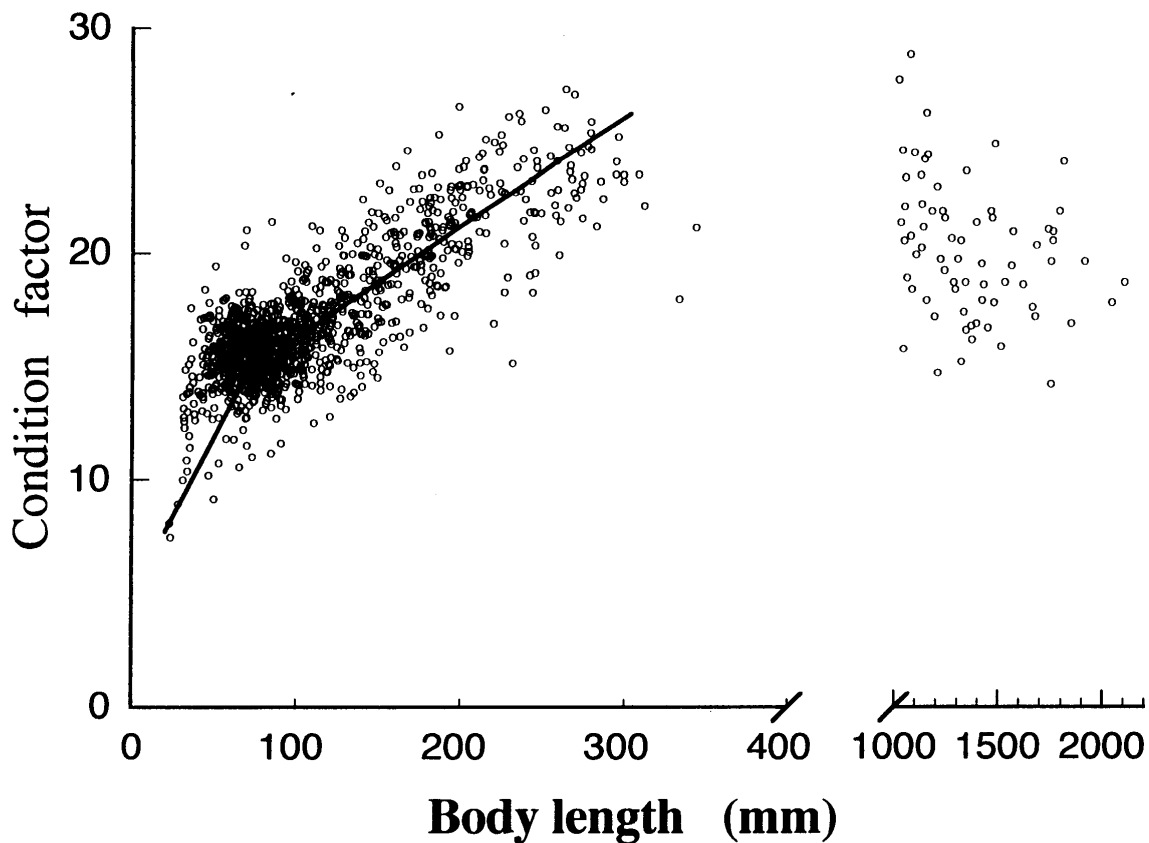


Fig. III-13. Change of the condition factor of the Pacific bluefin tuna after juvenile stage.
Specimens > 1000 mm BL were wild caught and raised.

BL まで等成長を示した後、優成長に移行した。

以上のうち特異的な点を挙げれば次の通りである。80 mm BL 以下での眼径、100 mm BL 以下での吻長、および 150 mm BL 以下での上顎長における相対成長係数は、いずれも 0.60~0.67 で著しい劣成長を示し、100 mm BL 以上の吻長、150 から 200 mm BL での体高および 200 mm BL 以降の尾柄高における同係数はそれぞれ 1.20、1.23 および 1.31 で、著しい優成長を示した (Table III-11)。

なお、成長屈折点が認められた 80、90、100、110、150 および 200 mm BL は、それぞれ孵化後 42、44、46、48、60 および 72 日目頃を中心とする時期に相当した。

(3) 外部形態の特徴

サバ型魚類であるクロマグロは、副鰭（小離鰭）がよく発達していることはよく知られている¹⁸¹⁾。また、サバ科に属する総ての魚類は何らかの形の尾柄隆起縁（caudal keel）を有している。なかでもマグロ属魚類は最も良く発達した尾柄主隆起縁および尾柄副隆起縁を持っており¹⁸²⁾、その発達の度合いは遊泳能力と正比例していると考えられる。すなわち、遊泳能力の向上とともに高速艇にみられる水中翼のように、推進軌道を安定させるための尾柄隆起縁が発達してくる¹⁸²⁾。また、渡辺（1970）は、稚魚の定義を第2背鰭および臀鰭とそれぞれの各離鰭を連ねていた膜鰭が消失し、各鰭が独立するまでの期間としている¹⁰⁷⁾。そこで、本研究では、稚魚から若魚への移行期の外部形態の指標としてサバ型魚類に特有の小離鰭の独立および尾柄主隆起縁の

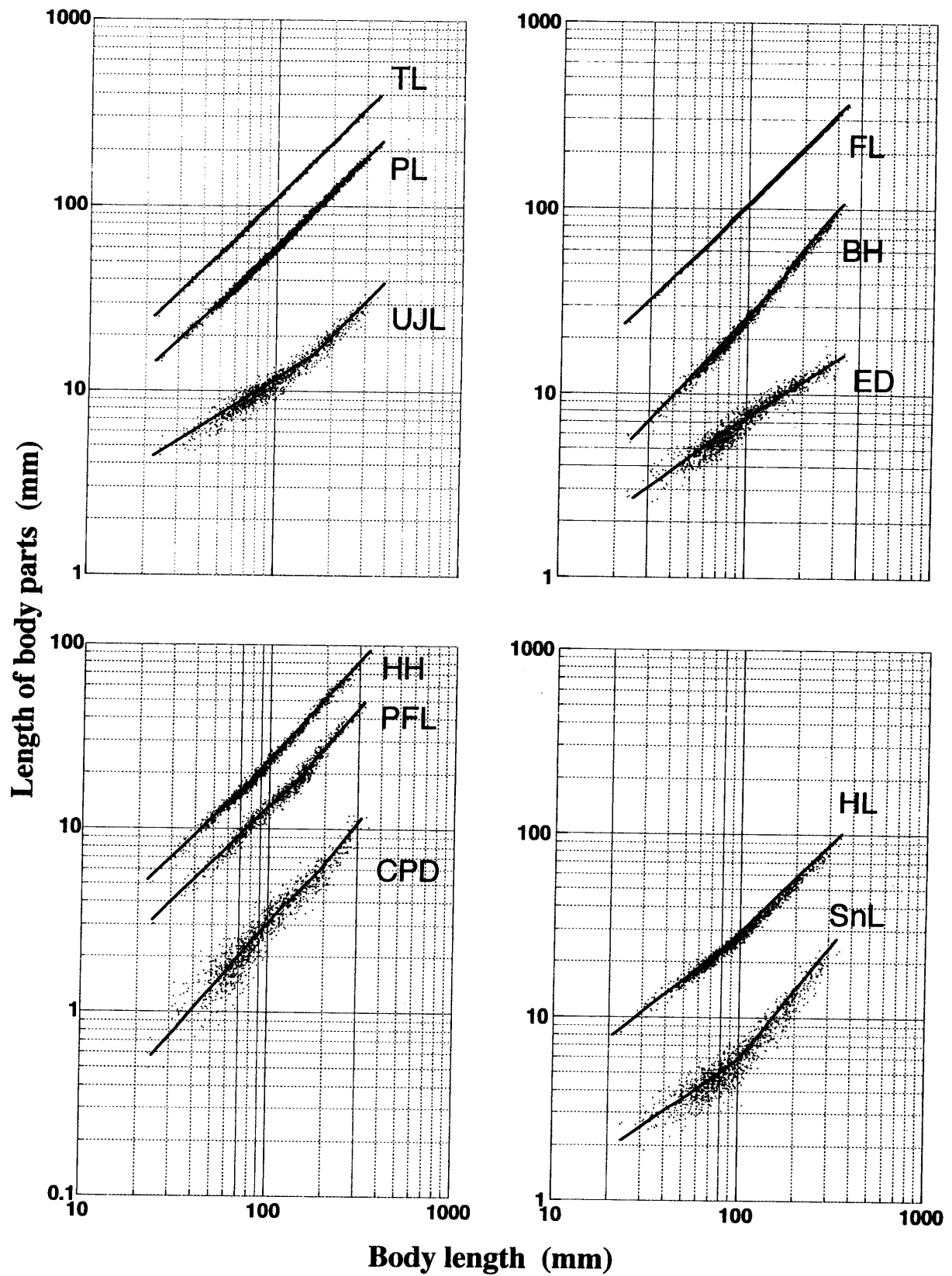


Fig. III-14. Relative growth of the Pacific bluefin tuna after juvenile stage. TL, total length; FL, fork length; PL, preanal length; BH, body height; HH, head height; HL, head length; ED, eye diameter; UJL, upper jaw length; CPD, caudal peduncle depth; SnL, snout length; PFL, pectoral fin length.

Table III -11. Allometry of the Pacific bluefin tuna (from juvenile to young stage)

| Body part | Range of body length (mm) | Allometry | | Correlation coefficient (R ²) |
|-----------------------|---------------------------------|-----------|------|--|
| | | ln a | b | |
| Total length | 23.25 ≤ BL < 80.00 | 0.23 | 0.97 | 0.99 |
| | 80.00 ≤ BL ≤ 343.54 | 0.11 | 1.00 | 1.00 |
| Fork length | 23.25 ≤ BL < 80.00 | 0.14 | 0.98 | 1.00 |
| | 80.00 ≤ BL ≤ 343.54 | 9.96 | 0.99 | 1.00 |
| Preanal length | 23.25 ≤ BL < 90.00 | -0.36 | 0.97 | 0.99 |
| | 90.00 ≤ BL ≤ 343.54 | -0.55 | 1.01 | 1.00 |
| Head length | 23.25 ≤ BL < 80.00 | -0.20 | 0.76 | 0.93 |
| | 80.00 ≤ BL ≤ 343.54 | -1.98 | 0.99 | 0.98 |
| Snout length | 23.25 ≤ BL < 100.00 | -1.08 | 0.60 | 0.55 |
| | 100.00 ≤ BL ≤ 343.54 | -3.83 | 1.20 | 0.89 |
| Upper jaw length | 23.25 ≤ BL < 150.00 | -0.62 | 0.67 | 0.89 |
| | 150.00 ≤ BL ≤ 343.54 | -2.08 | 0.97 | 0.86 |
| Eye diameter | 23.25 ≤ BL < 80.00 | -0.91 | 0.61 | 0.62 |
| | 80.00 ≤ BL ≤ 343.54 | -1.25 | 0.70 | 0.89 |
| Head height | 23.25 ≤ BL < 80.00 | -1.30 | 0.96 | 0.96 |
| | 80.00 ≤ BL ≤ 343.52 | -1.98 | 1.11 | 0.99 |
| Body height | 23.25 ≤ BL < 150.00 | -1.83 | 1.10 | 0.98 |
| | 150.00 ≤ BL < 200.00 | -2.47 | 1.23 | 0.82 |
| | 200.00 ≤ BL ≤ 343.54 | -1.74 | 1.09 | 0.92 |
| Caudal peduncle depth | 23.25 ≤ BL < 110.00 | -3.96 | 1.09 | 0.75 |
| | 110.00 ≤ BL < 200.00 | -3.01 | 0.91 | 0.63 |
| | 200.00 ≤ BL ≤ 343.54 | -5.20 | 1.31 | 0.65 |
| Body weight | 23.25 ≤ BL < 110.00 | -7.70 | 2.21 | 0.45 |
| | 110.00 ≤ BL ≤ 343.52 | -13.30 | 3.48 | 0.45 |

形成に注目し、稚魚後期から若魚期の外部形態を観察した (Fig. III-15)。

BL, 30~40 mm では膜鰭がまだ残っており小離鰭の独立は認められず、尾柄主隆起縁も観察されなかった。BL, 70~80 mm になると、未だ膜鰭は存在し小離鰭の独立は認められないが、7つの小離鰭が確認され、8つめの小離鰭がどうにか確認できた。また、尾柄主隆起縁の出現は、確認できる個体もみられたが多くの個体では観察されなかった (Fig. III-15-A)。

90 mm BL 前後で、完全な形ではないものの、8つの小離鰭の独立が確認された。また、尾柄主隆起縁は、多くの個体でその発現が確認されるようになったが、未だクロマグロ成魚の体型ではなかった。100 mm BL では、小離鰭の形が明瞭となり、尾柄主隆起縁はかなり発達し、容易に確認できるようになった (Fig. III-15-B)。150 mm BL になると小離鰭は完全な形を整え、尾柄主隆起縁はさらに発達し、体型がかなり成魚のそれに近づいた。200 mm BL では小離鰭が完成され、尾柄主隆起縁は十分に発達し、弾性ゴム状化した (Fig. III-15-C)。

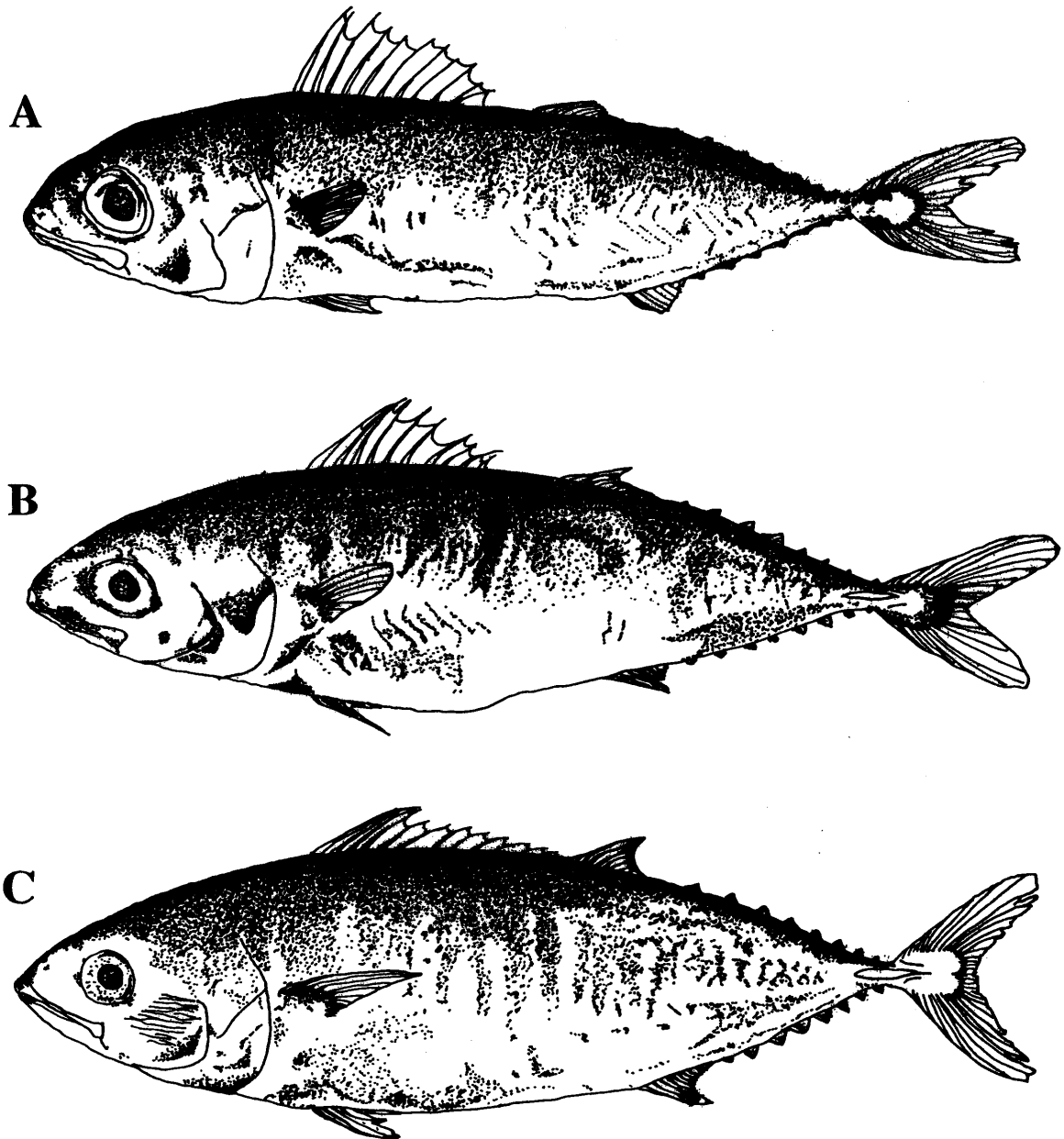


Fig. III-15. Form of juvenile and young in the Pacific bluefin tuna. A, late juvenile, 78.4 mm BL, 7.6 g B.wt; B, early young, 101.8 mm BL, 16.8 g B.wt; C, late young, 205.4 mm BL, 180.4 g B.wt.

Ⅲ-1-2-3. 考察

(1) 絶対成長

人工孵化クロマグロの成長速度は、測定開始時の孵化後 29 日目（平均 32.53 mm TL）から孵化後 110 日目頃（平均 307.84 mm TL）まで速く、その後遅くなったが、これは水温の低下と関係が深いものと考えられる。すなわち、成長速度が低下し始める水温域は 22～23℃で、これは第 I 章で述べたように産卵水温の下限に近い。また、本研究所が串本海域で養成しているクロマグロも、水温が 20℃以下になると摂餌が不活発になることが経験的に知られている。

魚体各部の成長では、眼径の成長度がやや早い時期に緩やかになったが、他の部位は全長と良く似た伸びを示した。体重の増加は、測定開始時から孵化後 70 日目まで指数関数的に増加し続

け、全長と同様に孵化後 110 日目以後はやや増加速度が遅くなった。

(2) 相対成長

多くの魚体各部の体長 (BL) に対する比率は 80~100 mm BL で一定になった。これは孵化後 45 日目頃に当たるが、このステージで成長様式の変化が認められる。すなわち、80~100 mm BL 前後で魚体の多くの部位に成長屈折点が認められ、魚体各部の BL に対する比率は 100 mm BL 以後ほぼ一定となった。

また、測定期間中を通じて等成長を示していた全長、尾叉長、肛門前長に加えて、100 mm BL 以後は、頭長、上顎長、頭高、体高が等成長を示し、測定部位の半数が等成長を示すようになる。従って、80~100 mm BL が大きな形態発育の変化点であることが明らかとなった。

(3) 外部形態の特徴

渡辺は、稚魚の定義を第 2 背鰭および臀鰭とそれぞれの各離鰭を連ねていた鰭膜が消失し、各離鰭が独立するまでの期間としている¹⁰⁷⁾。今回観察された鰭膜の消失、小離鰭の独立および尾柄主隆起縁の形成は、100 mm BL 前後に認められた。また、第ⅢおよびⅣ章で述べるように、筋肉や鰭の発達における成長屈折点および遊泳行動の変化など、多くの形態学的行動学的変化がこの時期に認められた、さらに、前述のように体各部の相対成長において、成長屈折点が 80~100 mm BL に集中したことなどから、この体長が稚魚から若魚への移行期にあたるものと考えられる。

(4) 成魚との比較

本実験での測定最大個体における体長に対する全長、尾叉長、肛門前長、頭長、吻長、上顎長および尾柄高それぞれの比率は、1,000~2,000 mm BL の未成魚および成魚の比率にほぼ等しかった。本実験で、ほとんどの部位の BL に対する比率がほぼ一定となったのが 200~250 mm BL であり (Fig. III-11, 12)、肥満度は 250 mm BL 付近で最大を示した。さらに、200 mm BL には尾柄高の成長屈折点がみられた。これにより 200~250 mm BL 付近でも成長様式に変化があったことが示唆される。渡辺は、マサバの若魚期の定義を魚体各部の相対比が成魚のそれとほぼ等しくなるまでの期間、ただし頭高、体高、頭幅、体幅を除くとしている¹⁰⁷⁾。この定義と、体側筋の発達過程 (第Ⅲ章) および各鰭の発達過程と遊泳行動の変化 (第Ⅳ章) から、200~250 mm BL 付近のクロマグロは若魚から未成魚への移行期に当たると考えられる。

(5) 孵化から若魚期までの総括

前項の孵化から稚魚期までの結果と今回の結果をまとめた。

クロマグロの相対成長は、標準体長 3.6 mm から 343.5 mm の間でどれもが 4 から 6 個の成長屈折点をもつ多相アロメトリーであり、孵化から稚魚期まで、および稚魚から若魚期までに得られた相対成長係数をそれぞれ Fig. III-16 および Fig. III-17 に示した。各部位の成長屈折点は、3~4 mm BL (頭長、吻長、眼径、頭高、尾柄高)、6~8 mm BL (全ての部位)、10~16 mm BL (全ての部位)、および 80~100 mm BL (全長、尾叉長、肛門前長、頭長、吻長、眼径、頭高、尾柄高) に集中していた。なお、初期飼育を調べた実験での 20 mm BL 以上、および稚魚期以降を

調べた実験での 80 mm BL 以下の相対成長係数において、一致しない部位（肛門前長，頭高，体高，尾柄高）がある。これは、別々に行った実験の後半および前端部分である故に生じた解析の誤差であろうが、この間のデータを合わせて解析すれば、新たな成長屈折点が存在する可能性がある。

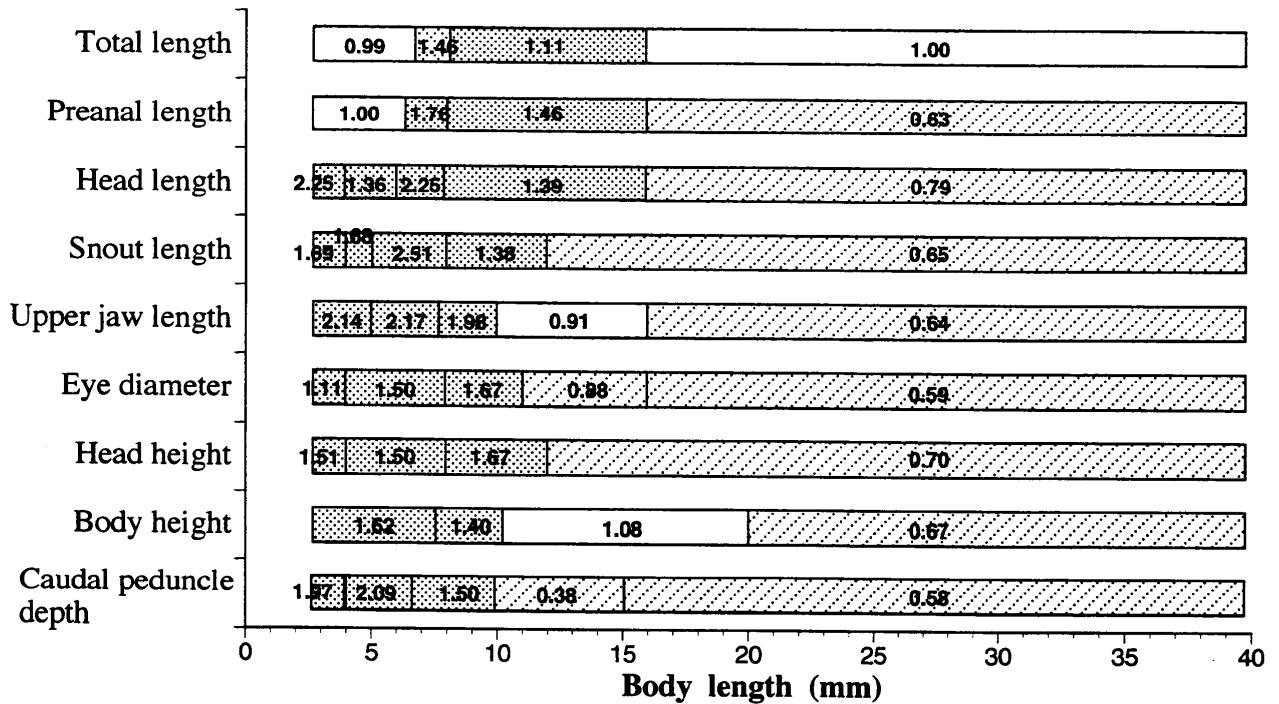


Fig. III-16. Allometry of the Pacific bluefin tuna on the 9 portions of body (from larva to juvenile).
 stippled, positive growth; white, isometry; cross-hatched, negative growth.

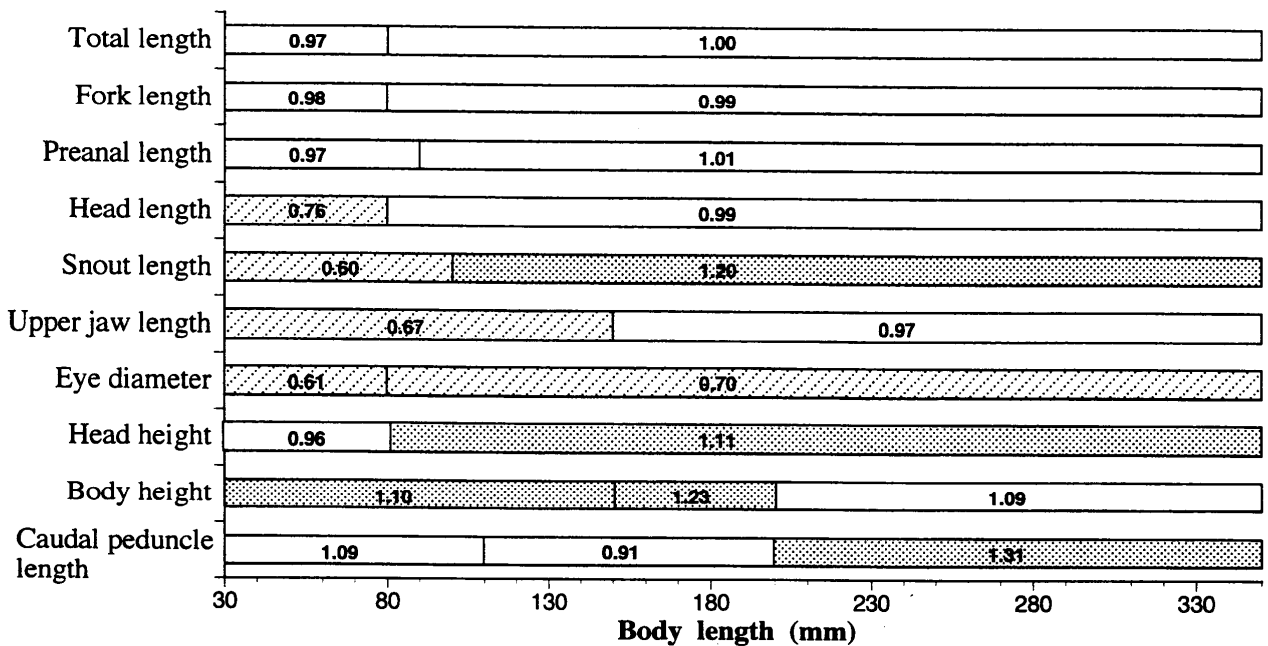


Fig. III-17. Allometry of the Pacific bluefin tuna on the 9 portions of body (from juvenile to young).
 stippled, positive growth; white, isometry; cross-hatched, negative growth.

本研究の結果から得られた孵化から若魚までの成長屈折点は、多くの部位で以上のように4つの体長付近に集中しており、それぞれ、前期仔魚から後期仔魚への移行期、flexion期、postflexionから稚魚への移行期、および稚魚から若魚への移行期に対応していた。これらの時期は、それぞれ、孵化後4日目、11から17日目、20から25日目、および45日目前後であった。

以上の相対成長を総括すると、頭部の各部位の体長比は、稚魚への移行期までに成魚の水準以上に増加させ、以後80~100 mm BLまで減少し続けた後一定となった。なお、眼径のみは未成魚に達してからさらに減少し続けることが示唆された。一方躯間部では、肛門前長が稚魚への移行期まで増加を続けて成魚の水準に達した後一定となるのに対し、体高は、稚魚への移行期に成魚の水準に達した後、80~100 mm BLまで減少を続け、以後増加に転じて200 mm BL付近で成魚の水準に戻った後一定となった。

また、飼育観察の結果、孵化後10日目までの初期減耗に続いて、10~20日目に共喰いの激化、および孵化後40日目以後に水槽壁への衝突死多発がそれぞれ観察され、大きな減耗期であることを認めた。その結果、実験終了時の生存個体数は約10尾となった。なお、postflexionから稚魚前期にかけての共喰いは、マダイ⁷⁴⁾やブリ¹⁸³⁾など多くの魚種で認められる現象であるが、衝突死は既往の種苗生産対象種では全く認められていない現象である。これらの減耗を防除するためには、小型個体の隔離、大型水槽または大型生簀への移し替え、激突時の衝撃緩和対策などが、孵化後10および30日目頃からそれぞれ必要である。

Ⅲ-2. 発育に伴う内部形態の変化

Ⅲ-2-1. 消化系の発達¹⁵⁵⁾

種苗生産における初期減耗を防除し、生残率を高めるためには、適正な餌料系列を設定する必要がある。その基礎として、形態発育とともに消化系の発達を把握することが重要である。しかし、クロマグロの成長に伴う消化系の発達については、孵化から体長12 mm (30日齢)までの報告¹⁸⁴⁾はあるが、一般的な種苗生産過程にわたる知見はない。そこで本研究では、孵化から体長30 mm (30日齢)までの成長に伴う消化系の発達および消化酵素活性について検討した。

Ⅲ-2-1-1. 材料および方法

(1) 供試魚および飼育法

1994年7月に、近畿大学水産研究所大島分室付近の海面網生簀で養成していた7歳親魚から自然産卵された受精卵をプランクトンネットで回収した。これを陸上のコンクリート水槽(20~60 m³)に収容し、30日間飼育した。組織学的観察に用いた供試魚の餌料系列および全長の変動をFig. Ⅲ-18に示した。

(2) 組織学的観察

消化系の発達を調べるために、孵化後12時間目から孵化後30日目まで毎日サンプリングした。供試魚はBouin液で4~24時間固定後80%エタノール中で保存した。保存したサンプルをパラ

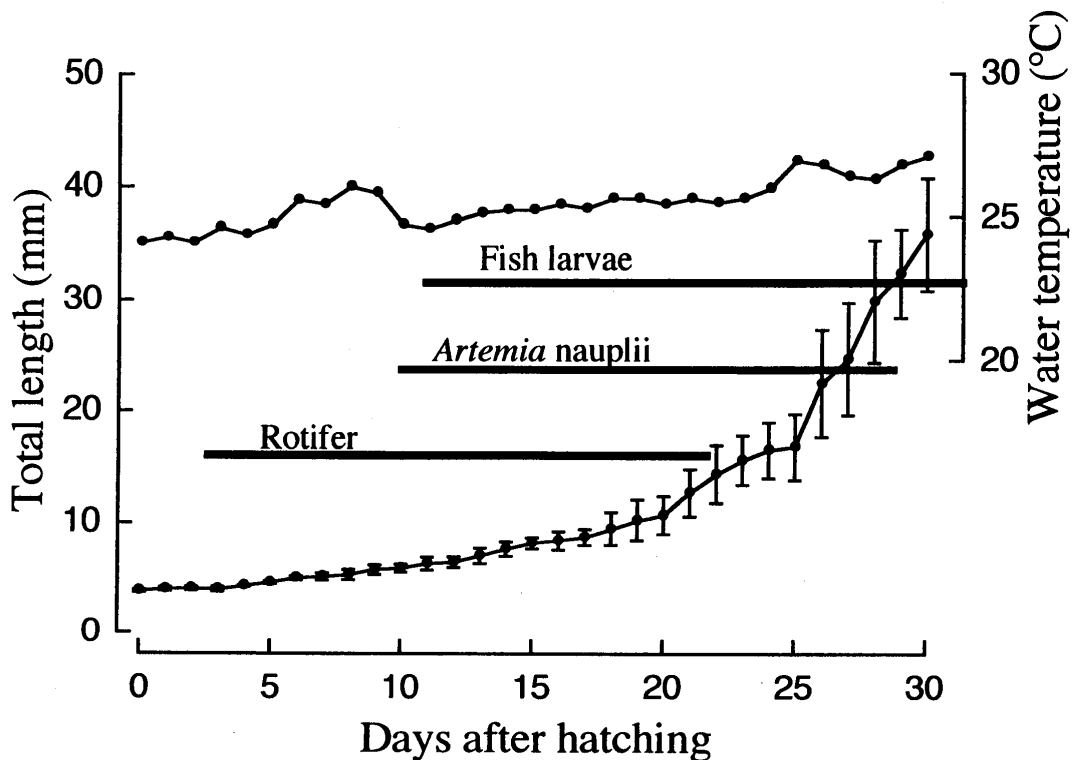


Fig. III-18. Growth curve and feeding schedule of the Pacific bluefin tuna.

フィンに包埋後、5~7 μ mの厚さの連続切片を作製し、ヘマトキシリン・エオシン染色を施して組織観察を行った。

(3) 消化酵素活性の測定

サンプリングは、孵化後0.5, 2, 4, 7, 10, 14, 19および29日目に行った。サンプルの重量は湿重で0.5~1.0gであった。初期飼育時の歩留まりにかなりのばらつきがみられたため、2ヶ所の飼育施設の20~90 m^3 容水槽4ロットからサンプリングした。サンプリングのロット、時刻、水温およびそのとき与えていた餌料をTable III-12に示した。Kawai and Ikeda^{185, 186)}の方法に従い、3酵素（トリプシン様酵素、ペプシン様酵素およびアミラーゼ）の活性を測定した（Table III-13）。各日齢より0.1~1.0gのサンプルを採取して、リン酸緩衝液とともにホモジナイズ後、遠心分離した上清を濾過して粗酵素液とした。トリプシン様酵素はカゼインを基質としpH 9.5で、ペプシン様酵素は酸変性ヘモグロビンを基質としてpH 2.0で、アミラーゼは溶性デンプンを基質として、pH 7.0でそれぞれ37°C・30分間の反応における生成物を測定した。酵素の活性は、体重mgあたりおよび魚体1尾当たりの生成物を、プロテアーゼではチロシン量として、アミラーゼではグルコース量としてそれぞれ表示した。

III-2-1-2. 結果

(1) 消化系の発達

孵化後12時間後（平均体長3.60 mm BL）：大きな卵黄と油球が観察された。孵化後12時間目までに腸管が開通したが、上皮は分化していなかった（Fig. III-19-A）。

孵化後36時間後（3.77 mm BL）：36時間目までに口が開き、消化管は開通した。肝臓、胆嚢

Table III-12. Sampling conditions of the Pacific bluefin tuna used for determining the activity of digestive enzymes

| Lots No. | Days after hatching | Sampling time | Water temperature (°C) | Foods |
|----------|---------------------|---------------|------------------------|--|
| FL-1*1 | 0.5 | 10:00 | 27.5 | |
| FL-1 | 2 | 13:30 | 27.1 | Rotifer |
| FL-1 | 4 | 13:30 | 27.5 | Rotifer |
| NC-1*2 | 7 | 18:00 | 27.8 | Rotifer |
| FL-2 | 10 | 14:00 | 27.7 | Rotifer, Brine shrimp, Copepoda |
| NC-1 | 14 | 11:00 | 28.8 | Rotifer, Brine shrimp |
| NC-2 | 19 | 10:00 | 25.0 | Rotifer, Brine shrimp, Larval fish |
| NC-2 | 29 | 16:00 | 25.0 | Rotifer, Larval fish, Artificial diets |

*1 FL: Fisheries Laboratory of Kinki University, Shirahama.

*2 NC: Kinki University Fish Nursery Center, Shirahama.

Table III-13. Assay methods for the activity of digestive enzymes

| Enzyme | Substrate | Buffer | Assay method |
|---------------------|---------------------------|---|-------------------------|
| Trypsin-like enzyme | Milk casein | 0.1M NH ₄ -NH ₄ Cl (pH 9.5) | FOLIN's method |
| Pepsin-like enzyme | Acid denatured hemoglobin | 0.25M CH ₃ COONa-HCl (pH 2.0) | ANSON's method |
| Amylase | Soluble starch | 0.1M NaH ₂ PO ₄ -Na ₂ HPO ₄ (pH 7.0) | SOMOGYI-NELSON's method |

および脾臓が分化し、腸と直腸との境界が明瞭になった (Fig. III-19-B)。

孵化後 60 時間後 (3.81 mm BL)：孵化後 60 時間目までにワムシの摂餌を開始し、消化過程にあるワムシがみられた。油球とほんのわずかな卵黄が残存していた。直腸上皮ではタンパク質の取り込みと思われる酸性顆粒 (直径, $6.2 \pm 0.3 \mu\text{m}$) が観察された (Fig. III-20-A)。

孵化後 3 日目 (3.71 mm BL)：孵化後 3 日目においても油球およびわずかな卵黄が残存していた。直腸上皮における活発なタンパク質の取り込みが観察された (Fig. III-20-B)。

孵化後 5 日目 (4.32 mm BL)：孵化後 5 日目の連続切片を示した。写真の番号が進むのに従い腸の回転する様子が観察された (Fig. III-21)。

孵化後 7 日目 (4.82 mm BL)：食道に多くの粘液細胞が認められた (Fig. III-22-A)。

孵化後 8 日目 (4.98 mm BL)：食道に咽頭歯が観察された (Fig. III-22-B)。

孵化後 10 日目 (5.58 mm BL)：孵化後 10 日目までに胃が幽門部より後方に伸長し、盲嚢部が形成されるとともに胃腺が分化し始めた (Fig. III-23-A, B)。

孵化後 12 日目 (6.06 mm BL)：上顎に顎歯が分化した。

孵化後 14 日目 (7.06 mm BL) : 下顎に顎歯が分化した (Fig. III-24-A)。

孵化後 15 日目 (7.48 mm BL) : 胃はさらに後方に拡大して胃腺の数が増加し、摂餌した仔魚が観察された (Fig. III-24-B)。また、胃と腸の境界部付近に幽門垂が分化し始めた (Fig. III-25-A)。

孵化後 16 日目 (7.75 mm BL) : 幽門部付近の腸上皮に多くの杯状細胞が認められた (Fig. III-25-B)。

孵化後 20 日目 (9.34 mm BL) : 胃は餌料で満たされ、盲嚢は著しく拡大し、胃壁が薄くなる様子がみられた。胃腺は胃壁のほぼ全体に分布した。15 日目に比べ幽門垂の盲管の数が増加した (Fig. III-26)。

孵化後 25 日目 (14.21 mm BL) : 腸と直腸との間に、さらに発達して複雑な構造を示すようになった幽門垂が観察された (Fig. III-27)。

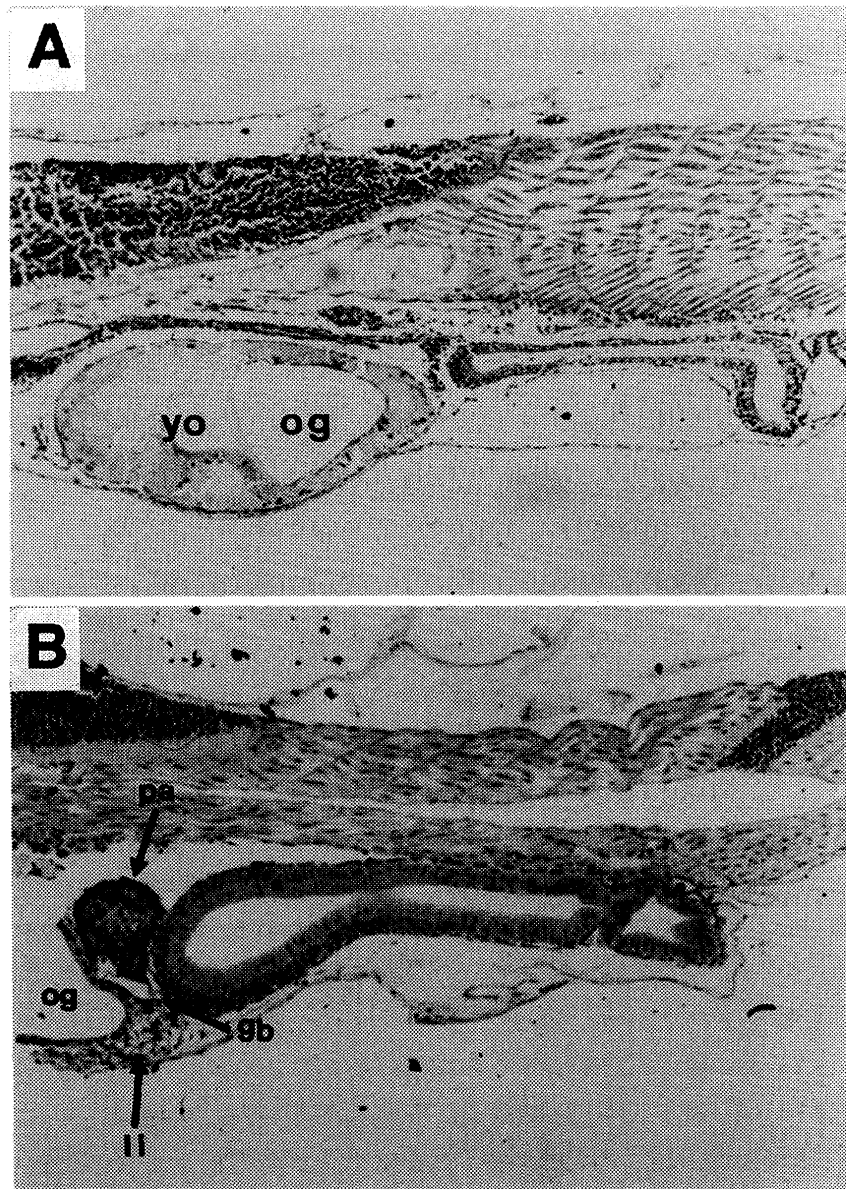


Fig. III-19. Longitudinal sections of larvae aged 12 hours (A) and 36 hours (B).
yo, yolksac; og, oil globule; pa, pancreas; gb, gall bladder; li, liver.

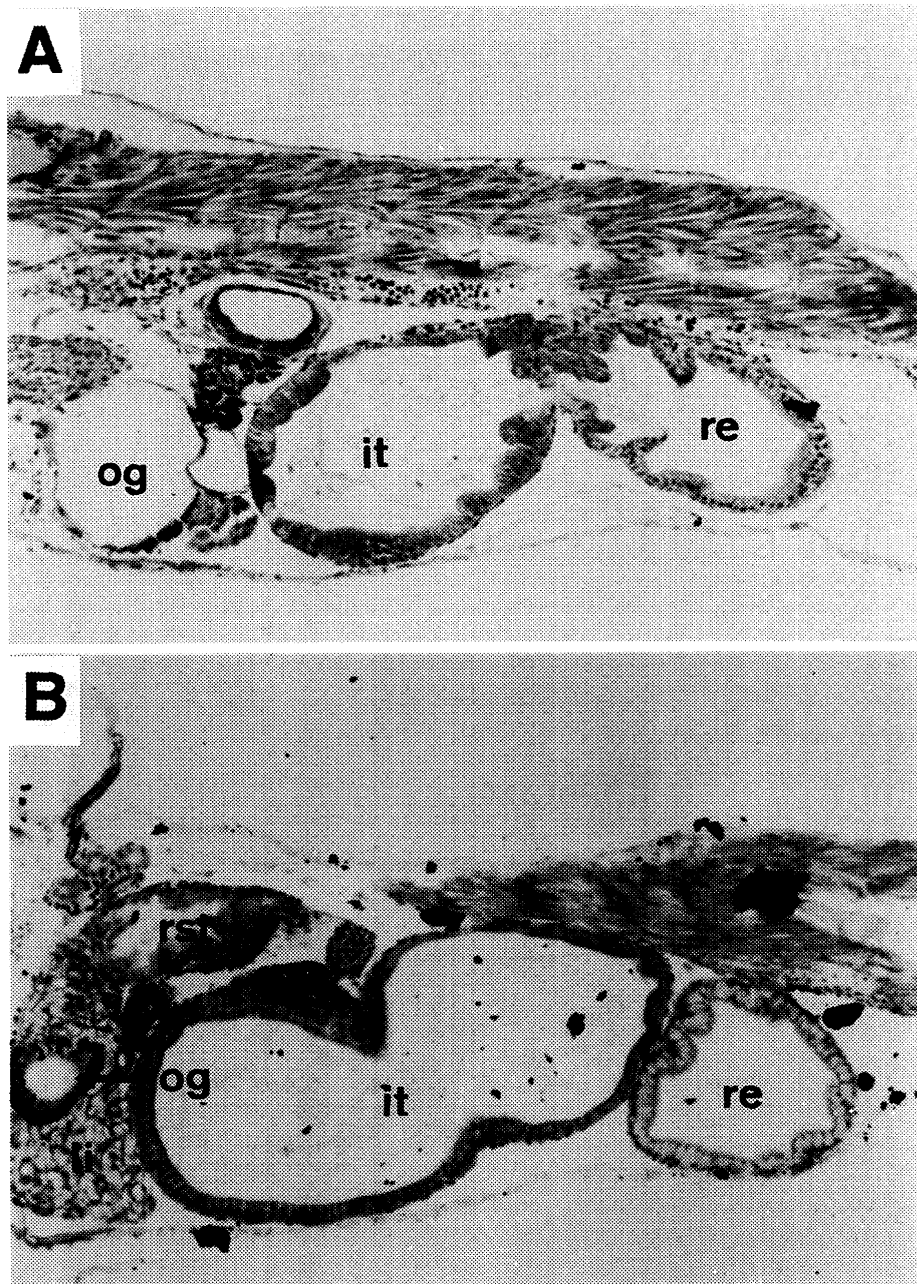


Fig. III-20. Longitudinal sections of larvae aged 60 hours (A) and 3 days (B). it, intestine; re, rectum; rst, rudimentary stomach.

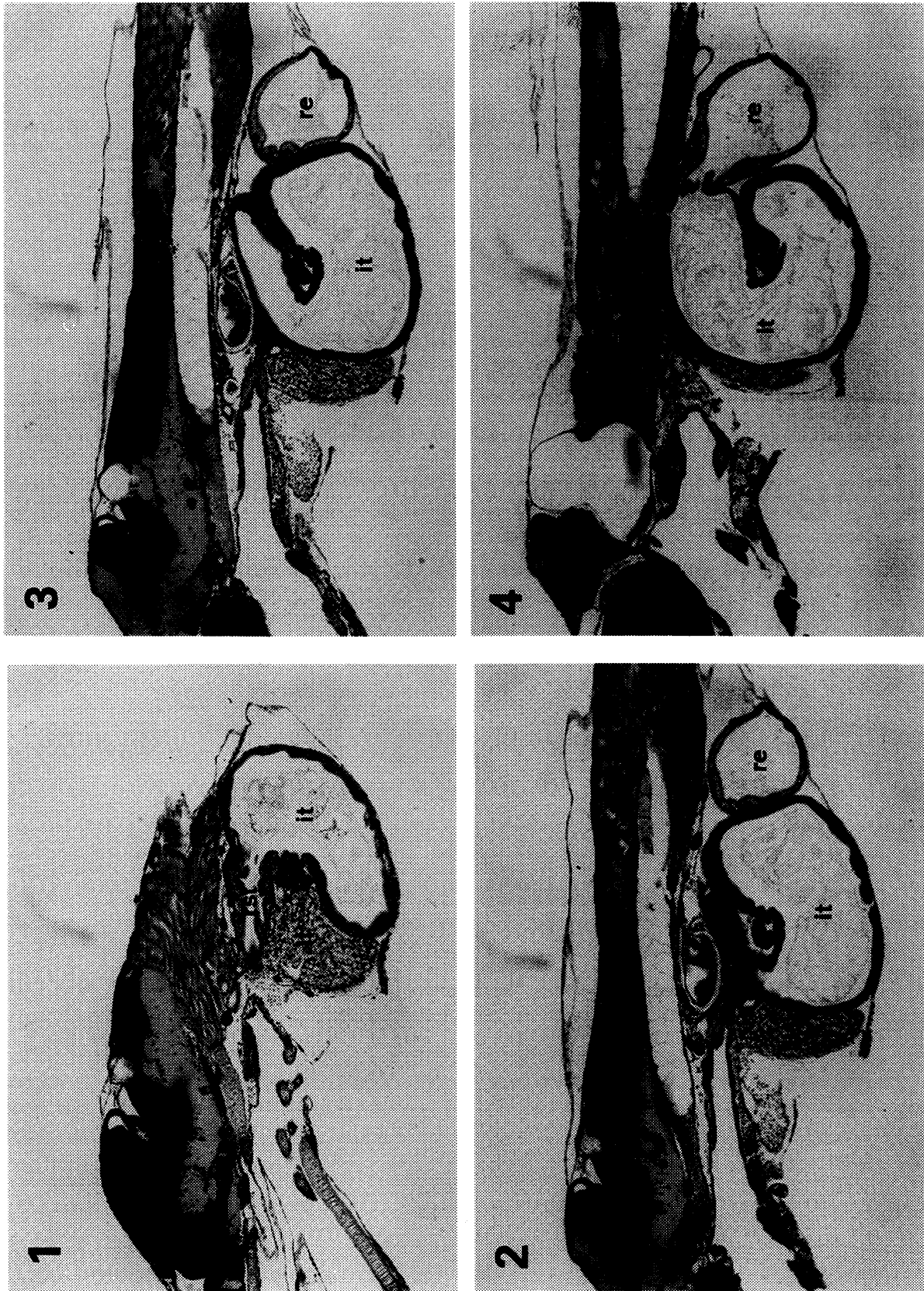


Fig. III-21. Longitudinal serial sections of larva aged 5 days. The photomicrographs (1-4) show coiling of the intestine.

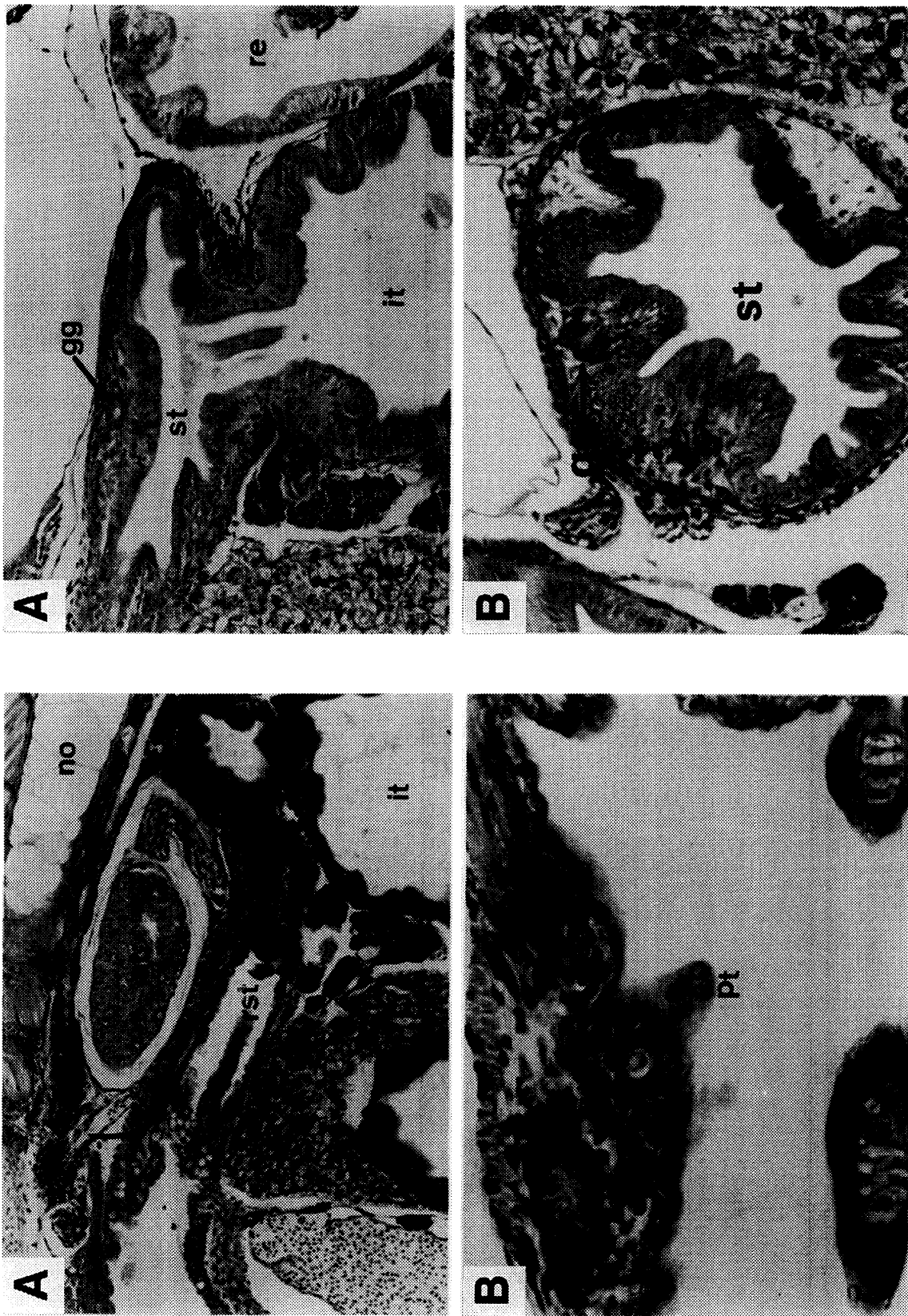


Fig. III-22. Longitudinal sections of larvae aged 7 days (A) and 8 days (B). Arrow shows mucous cells of esophagus. ab, air bladder; no, notochord; pt, pharyngeal teeth.

Fig. III-23. Longitudinal section (A) and cross section (B) of larvae aged 10 days. gg, gastric gland.

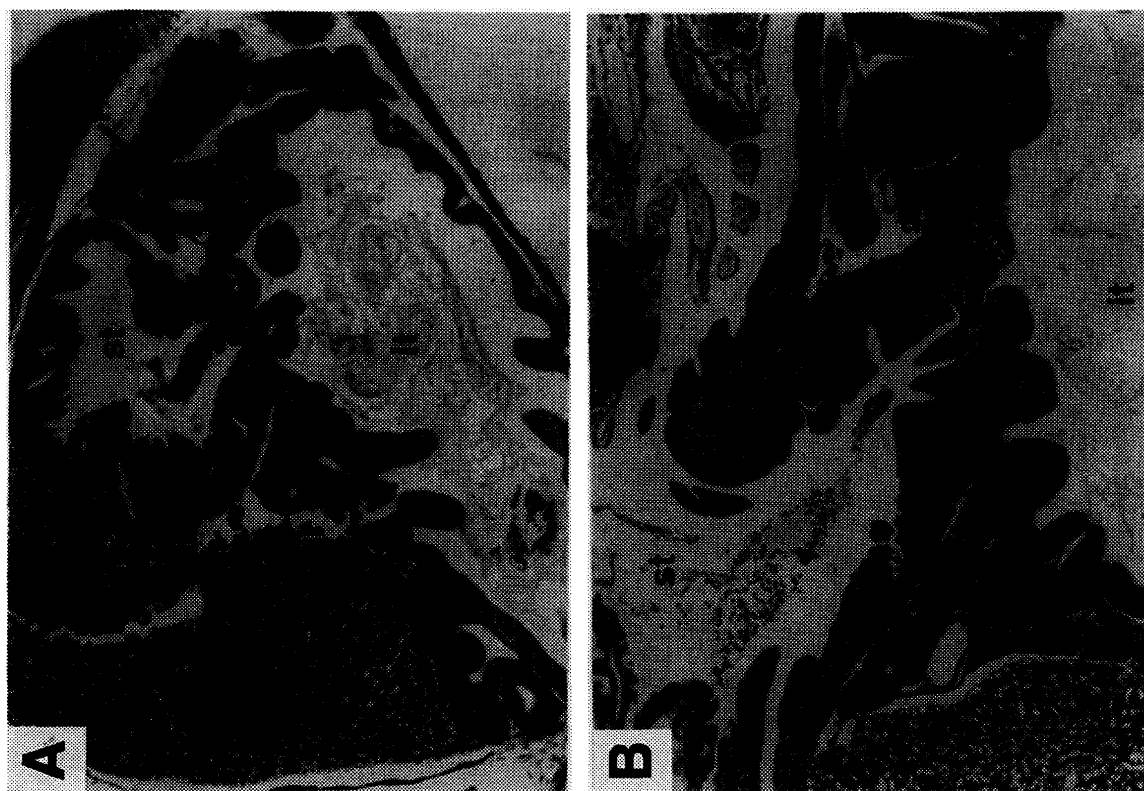


Fig. III-25. Longitudinal sections of larvae aged 15 days (A) and 16 days (B). pc, pyloric caeca; gc, goblet cells.

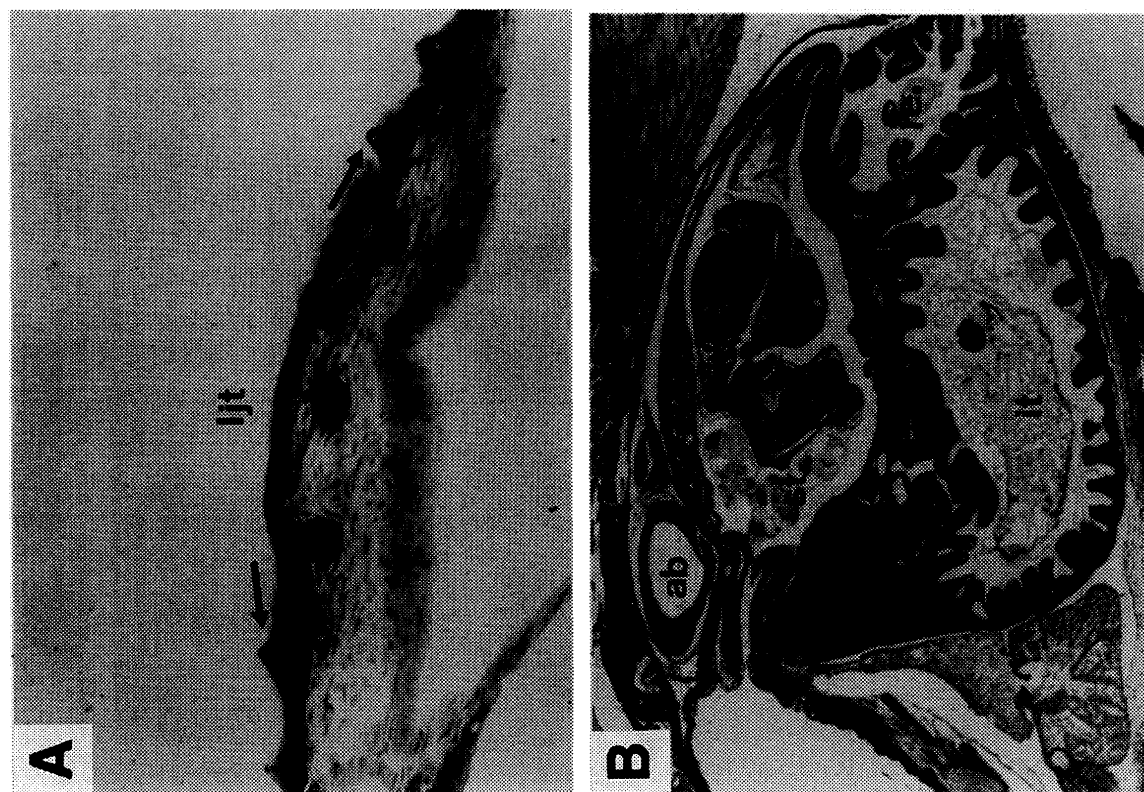


Fig. III-24. Longitudinal sections of larvae aged 14 days (A) and 15 days (B). lj, lower jaw teeth.

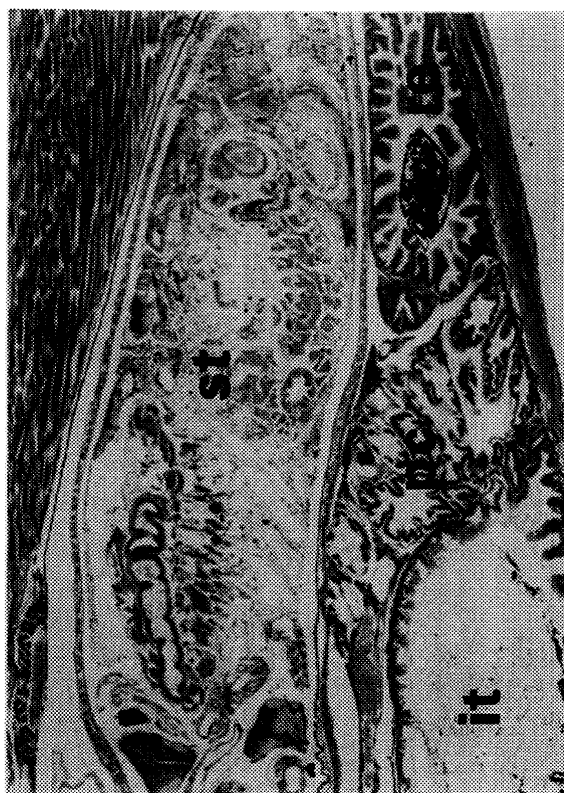
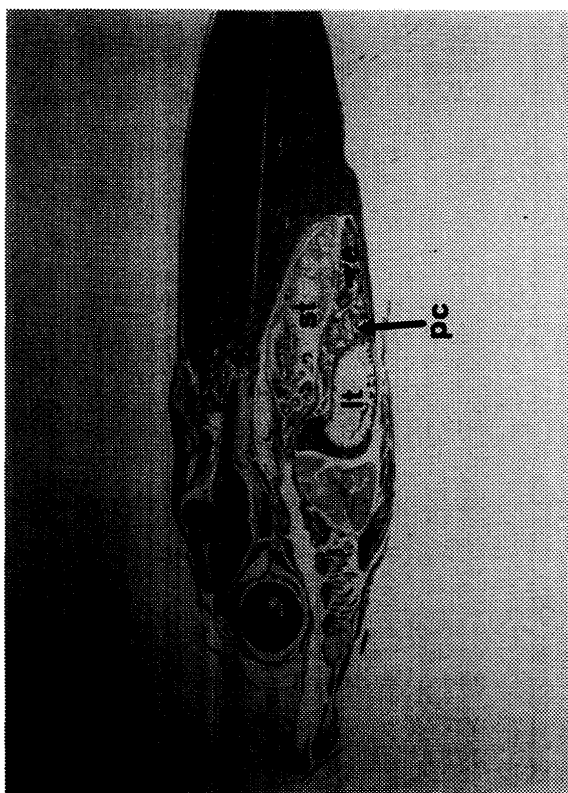


Fig. III-27. Longitudinal sections of juvenile aged 25 days.



Fig. III-26. Longitudinal sections of larva aged 20 days.

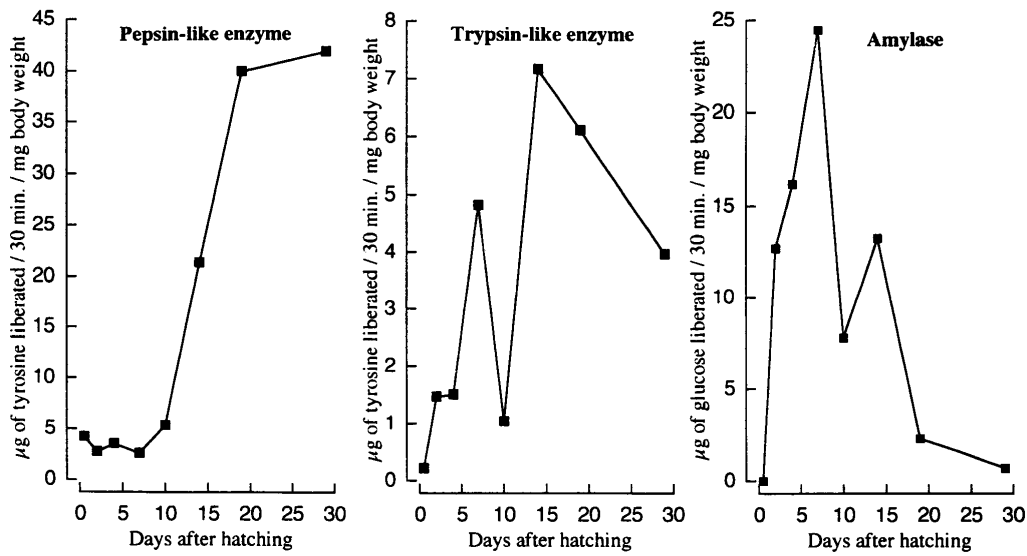


Fig. III-28. Changes in activity of the digestive enzymes (μg of tyrosine or glucose liberated / 30 min. / mg body weight) from larval and juvenile the Pacific bluefin tuna after hatching out.

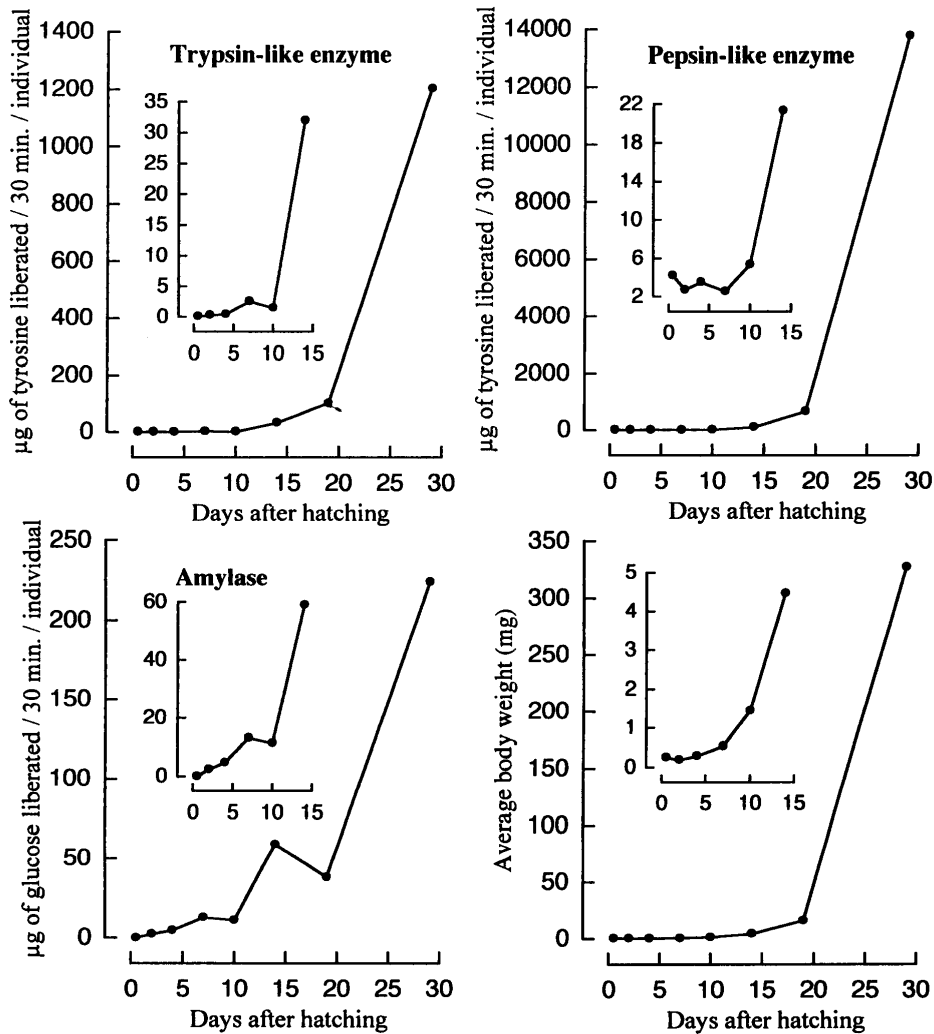


Fig. III-29. Changes in activity of the digestive enzymes (μg of tyrosine or glucose liberated / 30 min. / individual) from larval and juvenile the Pacific bluefin tuna after hatching out.

(2) 消化酵素活性の変動

クロマグロの成長に伴うトリプシン様酵素、ペプシン様酵素およびアミラーゼの体重 mg 当たりの活性を Fig. III-28 に示した。主に腸管内で作用するタンパク質分解酵素であるトリプシン様酵素の活性は孵化後日齢の経過とともに増加し、14 日目にピークを示した。一方、胃で作用するタンパク質分解酵素であるペプシン様酵素の活性は、孵化から 10 日目にかけては低い値で推移し、それ以降急激に増加した。これは胃腺の分化時期と一致した。糖質分解酵素であるアミラーゼの活性は、トリプシン様酵素と同様に孵化後日齢の経過とともに増加し、7 日目にピークを示した。Fig. III-29 には、魚体 1 尾当たりの活性を示した。トリプシン様酵素およびペプシン様酵素の活性はいずれも孵化後 10 日目以降魚体重の増加に伴い急激に増加した。一方、アミラーゼ活性は孵化後日齢の経過とともに緩やかに増加する傾向を示した。なお、孵化後 10 日目に脾臓酵素であるトリプシン様酵素およびアミラーゼの活性がいずれも低い値を示したが、このロットの魚にはサンプリング後、鰭などにエピテリオシスチス様のシスト^{187, 188)}の形成が確認されており、このことによる健康状態の悪化の影響ではないかと推測される。

III-2-1-3. 考察

クロマグロの成長に伴う消化系の発達と発育段階を比較して Fig. III-30 に示した。肝臓、脾臓、胆嚢、腸など仔魚の消化系に必要な最小限の形質は、yolksac 期の間に分化した。トリプシン様酵素およびアミラーゼ活性は、摂餌の開始後成長とともに増加した。咽頭歯および食道の粘膜細胞

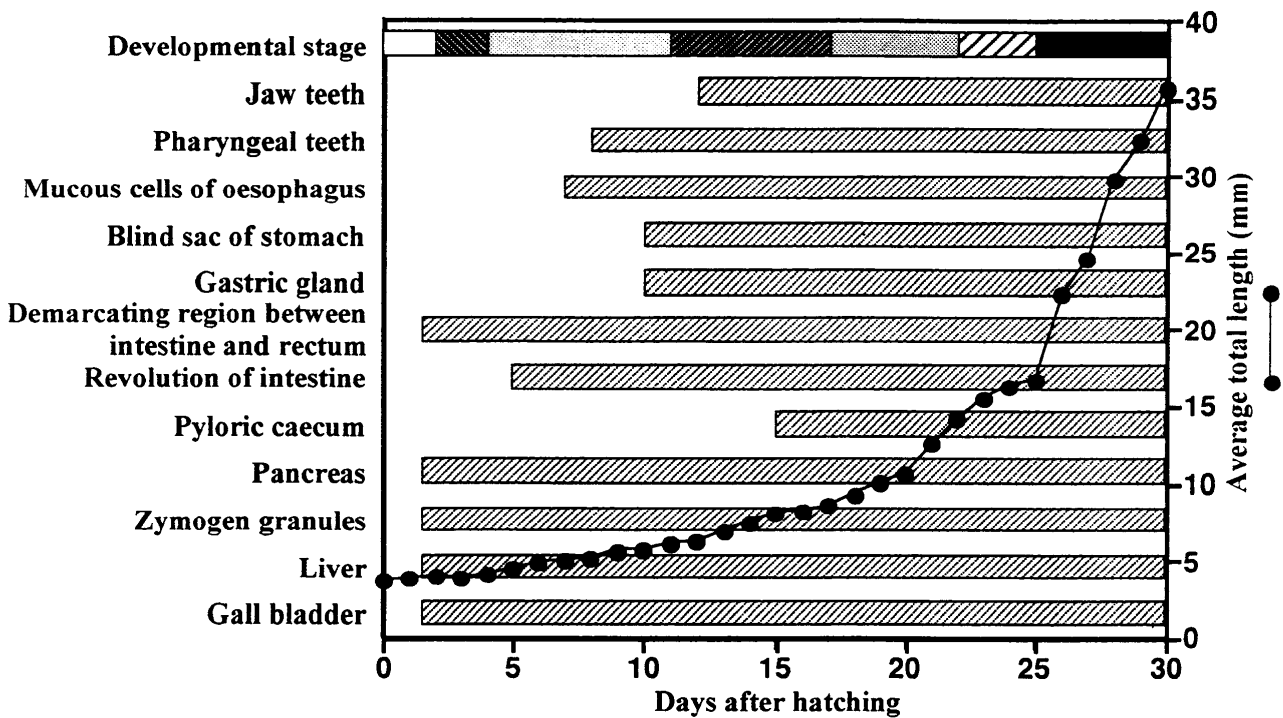


Fig. III-30. Relationship between differentiation age of the characters of digestive system and the developmental stages of larval and juvenile the Pacific bluefin tuna.

Developmental stages: Yolksac; Transition; Preflexion; Flexion; Postflexion; Transition; Juvenile.

は *preflexion* 期に分化し、この間に腸の回転が認められた。また、顎歯の機能化、並びに胃盲嚢、胃腺および幽門垂の分化の開始は *flexion* 期付近に集中して起こった。*flexion* 期にほとんどすべての消化系器官の分化が完了したが、それらの機能は成魚ほどには発達していなかった。*postflexion* から稚魚への移行期にかけてペプシン様酵素活性の増加、胃の機能化および幽門垂の発達が認められ、稚魚期にかけてそれらの機能が充実した。消化系形質の分化時期は Kaji et al.¹⁸⁴⁾ の報告とほぼ一致していた。

多くの魚類において、仔魚と成魚との消化系の主な相違点は、仔魚期の魚が胃および幽門垂を持っていない点である。異体類¹⁸⁹⁻¹⁹¹⁾ では、胃腺は変態期に形成される。Tanaka¹⁹²⁾ は、4 魚種、マダイ、クロダイ、カサゴ、*Sebastiscus marmoratus* およびアユ、*Plecoglossus altivelis* において胃腺は、成長速度の差異はあってもおおそ同じ発育段階、すなわち後期仔魚期の 2/3 の時期に形成されることを報告している。さらに、ブリ¹⁹³⁾、シロギス¹⁹⁴⁾、サバヒー、*Chanos chanos*¹⁹⁵⁾ およびウキゴリ、*Chaenogobius annularis*¹⁹⁶⁾ においても胃腺は後期仔魚期の後半に形成される。Tanaka¹⁹²⁾ はまた、上記の 4 魚種において幽門垂の分化はそれぞれの仔魚期から稚魚期への移行期に起こることを報告している。

一方、クロマグロにおいては胃腺および胃盲嚢は稚魚期以前の孵化後 10 および 15 日目にそれぞれ形成され、幽門垂もまた孵化後 15 日目に分化した。カツオ¹⁹⁷⁾ およびキハダ²¹⁾ においては、胃盲嚢および幽門垂が、それぞれ体長 4.1 mm および全長 4.5 mm で観察されている。本実験においては、胃盲嚢および幽門垂の分化した全長は、それぞれ 5.78 および 7.48 mm であった。従って、カツオおよびキハダにおけるこれらの形質の分化時期はマグロのそれよりも早いと考えられる。サワラ、*Scomberomorus niphonius* は¹⁹⁸⁾、摂餌開始時にはすでに胃腺および胃盲嚢を供えており、孵化後 7~8 日目には幽門垂の形成が始まる。以上のように、消化系の形成が初期発育段階で行われるのはサバ型魚類の特徴であるのかもしれない。いずれにしても比較的早い時期に消化系器官の分化が起こるクロマグロでは、仔魚期のエネルギー要求が高いものと推察される。クロマグロ成魚は非常に良く発達した幽門垂を持ち、その盲管数は 20,000 を超える。発育初期において、幽門垂は *flexion* 期から稚魚期にかけて急速に発達した。さらに、標準体長に対する肛門前長の比は、孵化後 11 日目頃までは約 40% でほぼ一定であったが、それ以降は孵化後 26 日目にかけて約 65% にまで増加した。孵化後 26 日目から 30 日目までの間、この値はほとんど変化しなかった (Fig. III-31)¹⁵⁶⁾。これらの結果は、孵化後 12 日目以前の消化系の発達は主として質的なものであり、12 日目から 26 日目にかけては主に量的に発達することを示唆する。この質的および量的な消化系の発達が稚魚期における急速な成長 (Fig. III-18)¹⁵⁶⁾ に貢献するものと推察される。

多くの魚種において^{185, 186, 191, 199-203)}、トリプシン様酵素あるいはアミラーゼ活性が摂餌の開始時に検出されている。クロマグロでは、孵化後 2 日目の摂餌開始時の仔魚に両酵素の活性が認められ、それらは成長とともに増加した。魚体重 mg 当たりのトリプシン様酵素およびアミラーゼ活性は、孵化後 15 および 10 日目以降にそれぞれ減少したが、その減少の程度はトリプシン様酵素よりもアミラーゼの方が顕著であった。魚体重 mg 当たりのペプシン様酵素活性は、胃腺の分化後急激に増加し、稚魚期 (孵化後 29 日目) まで高いレベルを維持した。これらの結果は、外部および消化系の形態あるいは代謝パターンの変化に伴う食性の変化が起こったことを意味すると考えられ、今後、クロマグロ仔稚魚の栄養要求や代謝パターンの特性を調べる必要があると考え

られる。

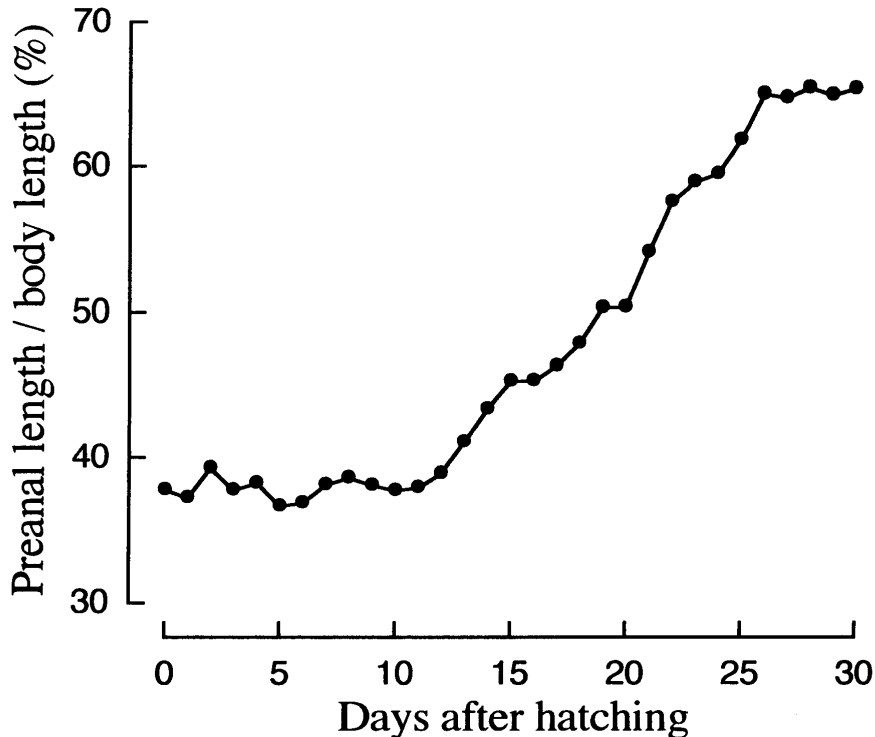


Fig. III-31. Changes in the ratios of preanal length to body length of larval and juvenile Pacific bluefin tuna after hatching out.

Ⅲ-2-2. 筋肉形成²⁰⁴⁾

本種の種苗生産においては、稚魚から若魚期における衝突死^{38, 207)}、ハンドリングの難しさ^{206, 207)}、活魚輸送の難しさ^{38, 208)}、などクロマグロ特有の問題点が多い。それらのうちの衝突死については、第Ⅳ章で述べるが体長 80 から 160 mm において頻繁に観察される。稚魚期におけるクロマグロは音や振動に極めて敏感で、容易に狂奔し水槽壁へ衝突する²⁰⁹⁾。それは、遊泳力および感覚器の発達過程と大きく関係しているものと考えられる。体側筋は、遊泳力を直接生み出し²¹⁰⁾、マグロのそれも他の魚種²¹¹⁾と同様に、肉色により血合肉と普通肉に大別される。これらはそれぞれ、赤色筋繊維と白色筋繊維から構成されている²¹⁰⁾。持続的な巡航遊泳には、遅い収縮速度で好氣的な赤色筋繊維を主に用い、突進遊泳では、速い収縮速度で嫌氣的な白色筋繊維が用いられる²¹²⁾。従って、それぞれの筋肉の発達について調べることは、行動の発達についての情報を得るだけでなく、衝突死を回避するための重要な情報となる。本項では、クロマグロの稚魚から若魚期にかけての筋肉量の変化、並びに赤色および白色筋繊維の断面積、およびその本数の変化について調べた。

Ⅲ-2-2-1. 材料および方法

(1) 供試魚

1996 年から 1998 年の、それぞれ 6 月から 8 月にかけて近畿大学水産研究所大島分室で、1987 年級群養成クロマグロ親魚 (9~11 歳) より自然産卵された卵を採取した。得られた卵を 60 km

離れた近畿大学水産養殖種苗センター白浜事業場へ輸送し、100 m³容水槽へ収容した。餌料としては、ワムシを孵化後2日目より、アルテミアのノープリウスを孵化後10日目より、イシダイ孵化仔魚を孵化後10日目より、イカナゴのミンチを孵化後20日目より、それぞれ給餌した (Fig. III-32)。実験期間中の水温は、1996年には24.8~27.4℃、1998年には24.8~27.5℃であった。

筋肉体積の測定には、1996年および1998年に飼育した体長 (BL) 47.0 mm (孵化後36日目、稚魚期) から152.3 mm (孵化後61日目、若魚期) の個体115尾を用いた。

筋繊維断面積の測定には、1998年に飼育した19.5 mm BL (孵化後24日目、稚魚期) から163.0 mm BL (孵化後63日目、若魚期) のクロマグロ41尾を用いた。これより大きな個体について、天然産の0歳魚5尾 (183~326 mm BL) およびこれを養成した2歳魚4尾 (1,164~1,240

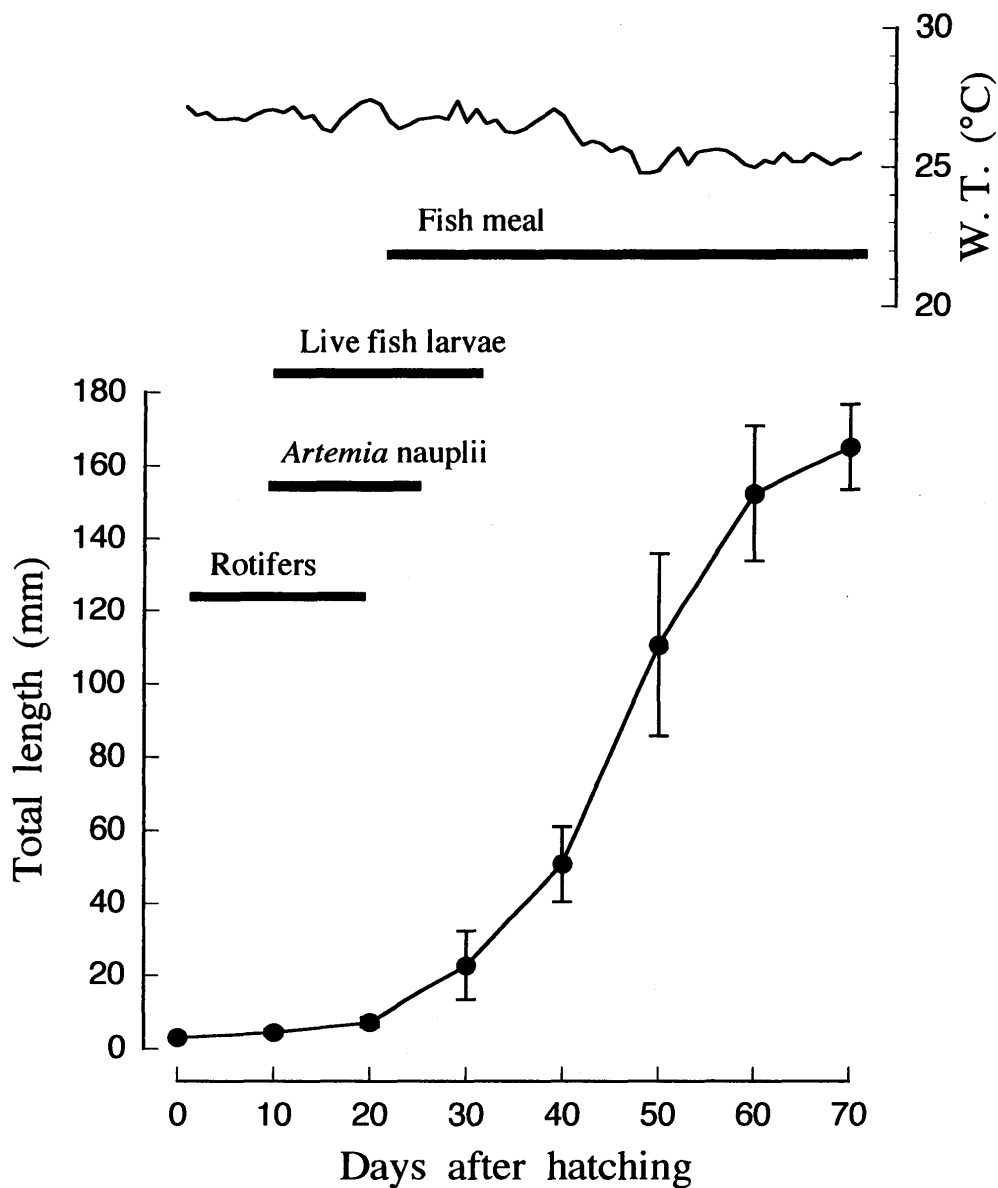


Fig. III-32. Growth, water temperature, and feeding schedule of the Pacific bluefin tuna. ● indicates the mean of body length at 10 days interval. Vertical bars show standard deviations.

mm BL) を同様に測定した。筋繊維本数の計数は、筋繊維断面積を測定した個体の中から 49.0~153.0 mm BL の 15 個体を用いて測定した。それぞれの供試魚は、水槽から柔らかいメッシュネット、あるいは釣りによって取り上げ、ただちに 10% 中性ホルマリンに浸漬し固定した。

(2) 筋肉体積

筋肉体積は横断面積法により求めた²¹³⁾。まず、魚体を胸鰭の前端から尾柄主隆起縁の前端まで 8~13 等分に切断し、横断面をイメージスキャナおよびコンピューターによりデジタル画像に変換した。それぞれの横断面をパラフィンに包埋し、ミクロトームにより 6 μ m に薄切、ヘマトキシリン・エオジン染色を施し組織切片を作製した。血合筋と普通筋の判別は、組織切片の肉色と筋繊維の位置により判断した^{211, 214)}。血合筋と普通筋の面積は、NIH-Image によりそれぞれの横断面を決定し、それぞれの面積を積分することで、全魚体の体側筋の体積を概算した。

筋肉体積 (y) と体長 (x) の関係を相対成長式で示した。相対成長式の回帰直線の傾きは最小二乗法により求めた。それぞれの直線の屈折点の位置は、最も適当と思われる位置に主観的に設定したが、それぞれの直線には統計的な有意差が認められた ($p<0.01$)。

(3) 赤色および白色筋繊維断面積

赤色および白色筋繊維の断面積は、体高最大部において次の測定方法により決定した。表層血合筋および肩の部分の白色筋の断面をパラフィンに包埋し、4~6 μ m に薄切、ヘマトキシリン・エオジン染色を施した。CCD カメラを装着した顕微鏡で NIH-Image を用いて筋繊維断面積を測定した。測定は 1 個体当たり 200 本の筋繊維について行った。得られた結果は、以下に示す代表的な発育段階でヒストグラムにより示した。すなわち、稚魚前期 (19.5 mm BL)、稚魚中期 (56.0 mm BL)、若魚への移行直後 (110.0 mm BL)、並びに天然産養成個体の初期未成魚 (326.0 mm BL) および 2 歳未成魚 (1,200.0 mm BL) である。

(4) 赤色および白色筋繊維の本数

赤色および白色筋繊維の本数は体高最大部で決定した。全筋繊維数は $1 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 内の本数と、それぞれの筋肉の断面積を測定することにより推定した。

III-2-2-2. 結果

(1) 体側筋の体積

血合筋および普通筋の体積は成長に伴い増加した (Fig. III-33)。それぞれの筋肉の成長に合わせて引いた回帰直線は体長 80 mm 付近に屈折点を認めた。体長 80 mm を越えた大きさでは、体積がより顕著に増加した。

全体側筋に占める血合筋の割合は、体長 47.0~152.3 mm の範囲で概ね 8~9% と一定であった (Fig. III-34)。

(2) 筋繊維断面積

体高最大部における赤色および白色筋繊維の断面積は、19.5 mm BL でそれぞれ 31.7 ± 21.3 および $129.5 \pm 108.4 \mu\text{m}^2$ であったが、80 mm BL 付近まで急激に増加した。白色筋の断面積はその

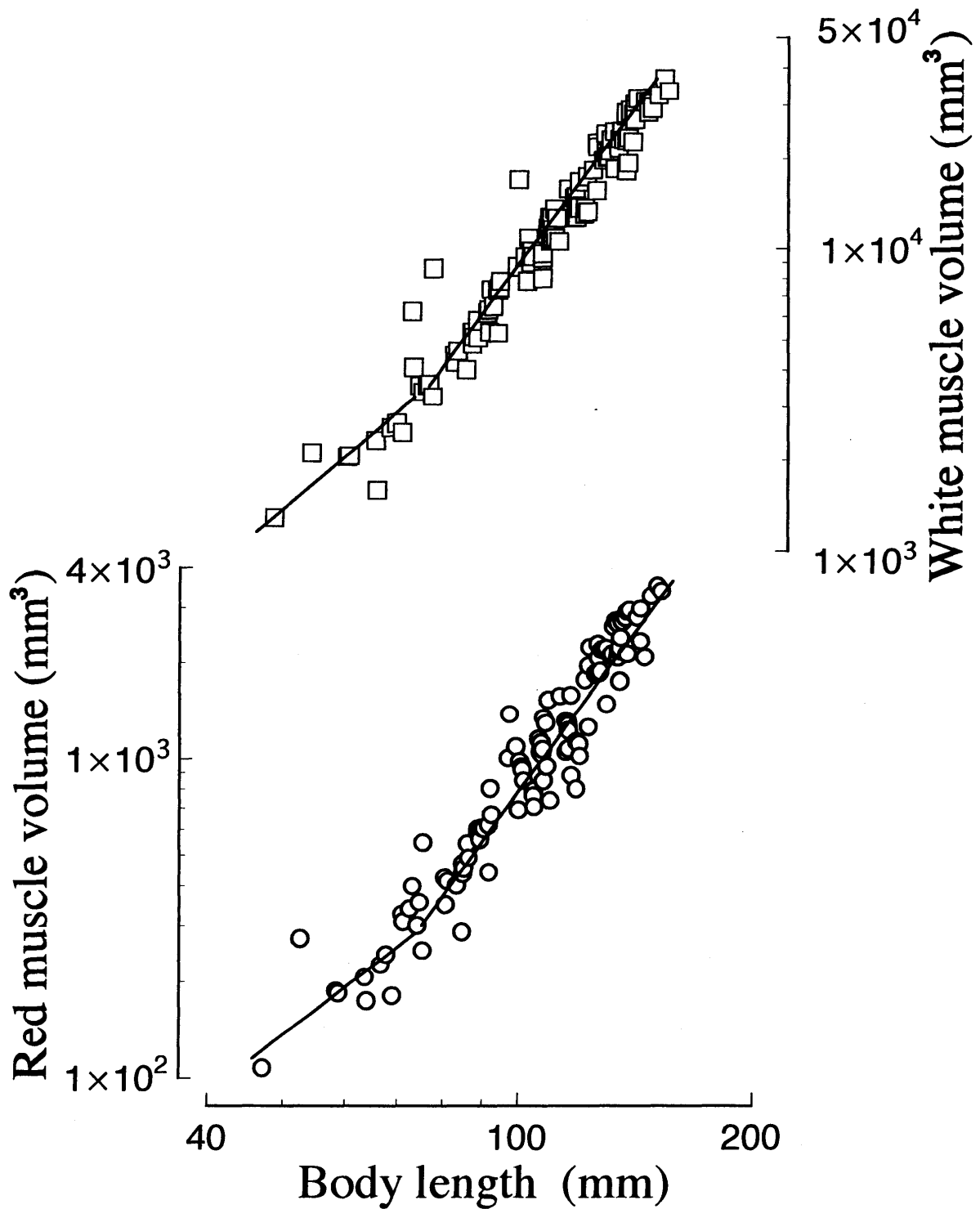


Fig. III-33. Allometry of red and white lateral muscle volume of the Pacific bluefin tuna. Figures by regression lines indicate the slopes of lines. \circ , red muscle; \square , white muscle.

後も 163 mm BL ($1,372.0 \pm 1,257.5 \mu m^2$) まで同様に増加した。185mm BL 付近で人工孵化個体と同レベルであった天然産個体の白色筋断面積は、250 mm BL 付近まで増加を続けた後、2 歳魚（未成魚）とほぼ等しくなった。一方、80 mm BL 以降の赤色筋断面積の増加率はやや低下し、

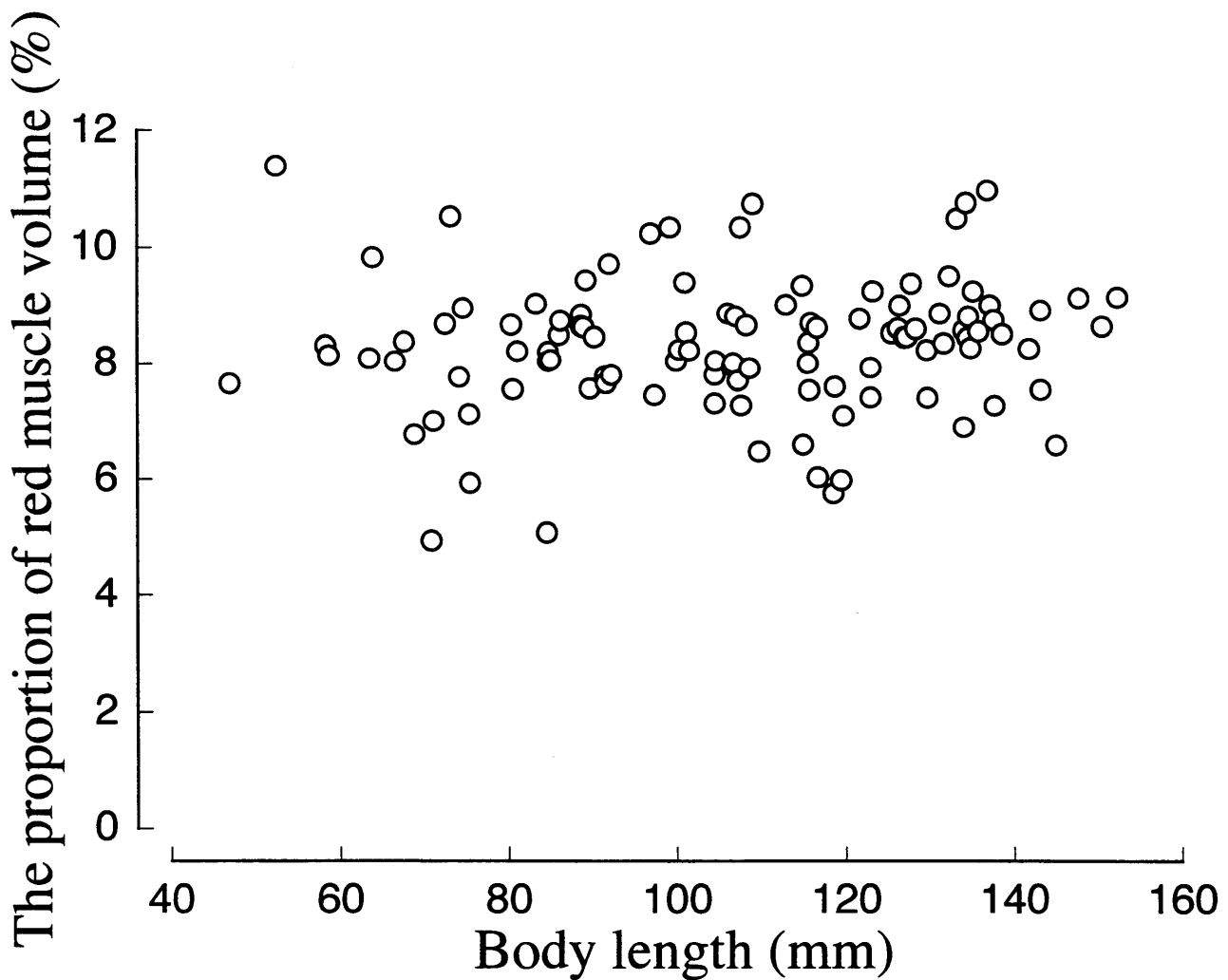


Fig. III-34. Proportional change of the red muscle volume against the total lateral muscle volume of the Pacific bluefin tuna.

163 mm BL で $196.1 \pm 127.2 \mu\text{m}^2$ に達した。白色筋と同様に、185 mm BL で人工孵化個体と同レベルであった天然産個体の赤色筋断面積も 250 mm BL 付近まで増加を続け、2 歳魚のそれに近い水準に達した (Fig. III-35)。

赤色筋繊維において、断面積 $100 \mu\text{m}^2$ 程度の小さな繊維は 110 mm BL より大きな魚では見られなかった (Fig. III-36)。白色筋繊維では、断面積 $200 \sim 300 \mu\text{m}^2$ 程度の小さな筋繊維がいずれの大きさの個体にも存在した。

(3) 筋繊維数

体高最大部における赤色筋繊維の筋繊維数は発育とともに増加した (Fig. III-37)。白色筋繊維数もまた発育に伴って増加したが、85 mm BL でその近似直線に屈折点が存在した。85 mm BL より大きな魚体では、白色筋繊維数が有意に増加した ($p < 0.05$)。

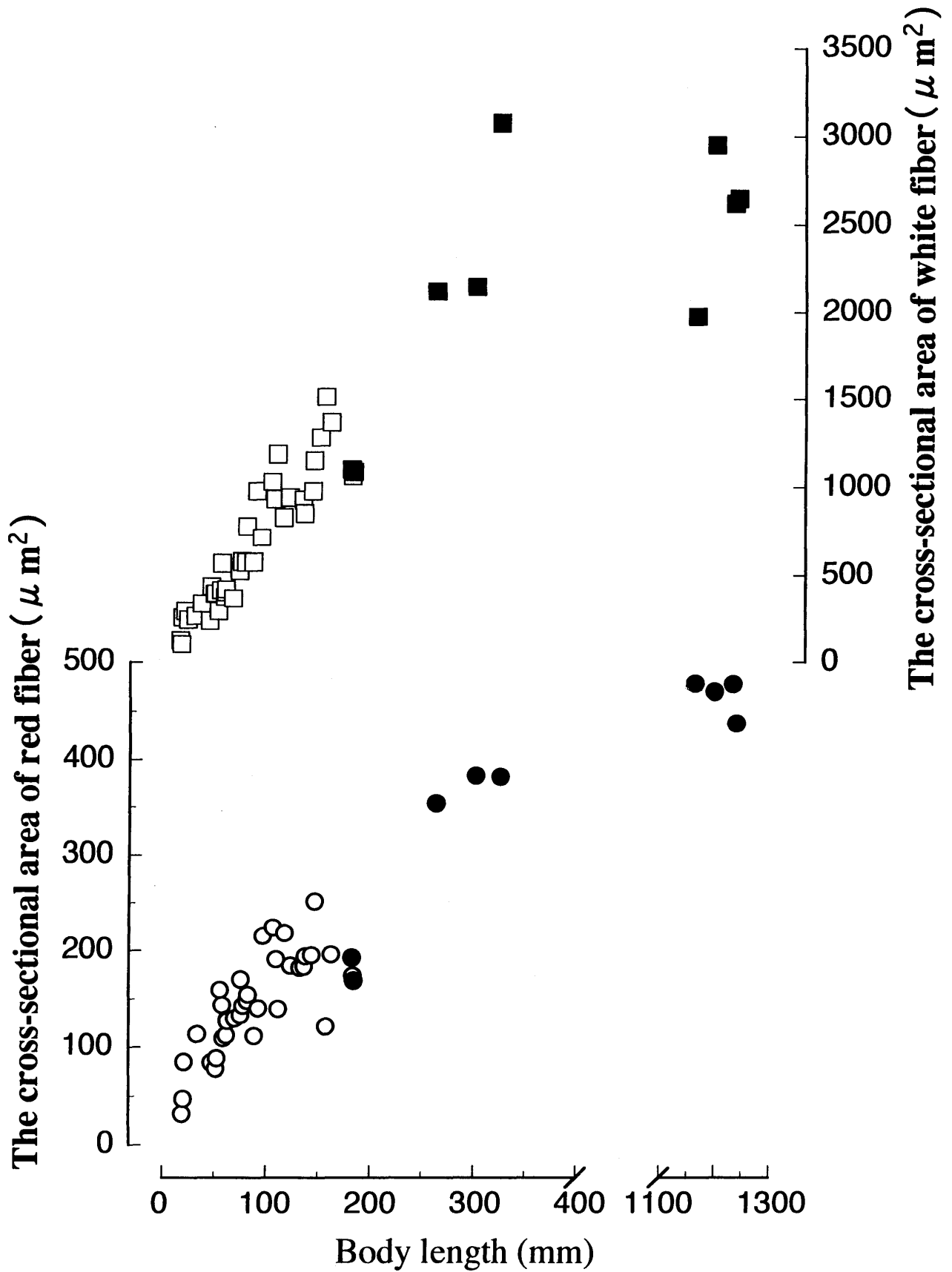


Fig. III-35. Ontogenetic changes of the Pacific bluefin tuna red and white fiber cross-sectional area at the body portion of maximum body height. ○, red muscle fibers; □, white muscle fibers; ● and ■, wild-caught fish.

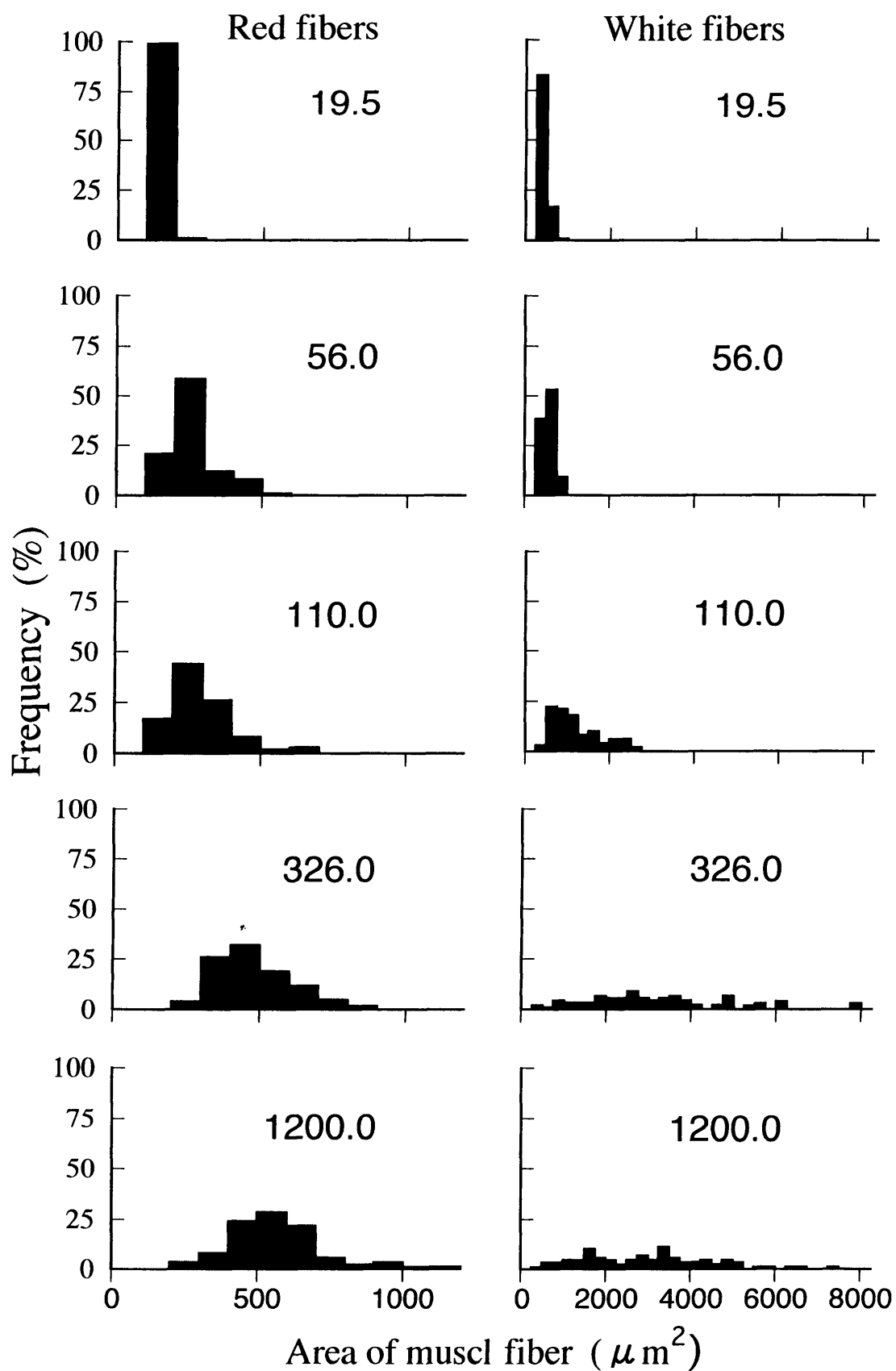


Fig. III-36. Frequency distribution of cross-section area of red and white muscle fibers at the maximum body height of the Pacific bluefin tuna. Figures in each graph indicate body lengths in mm.

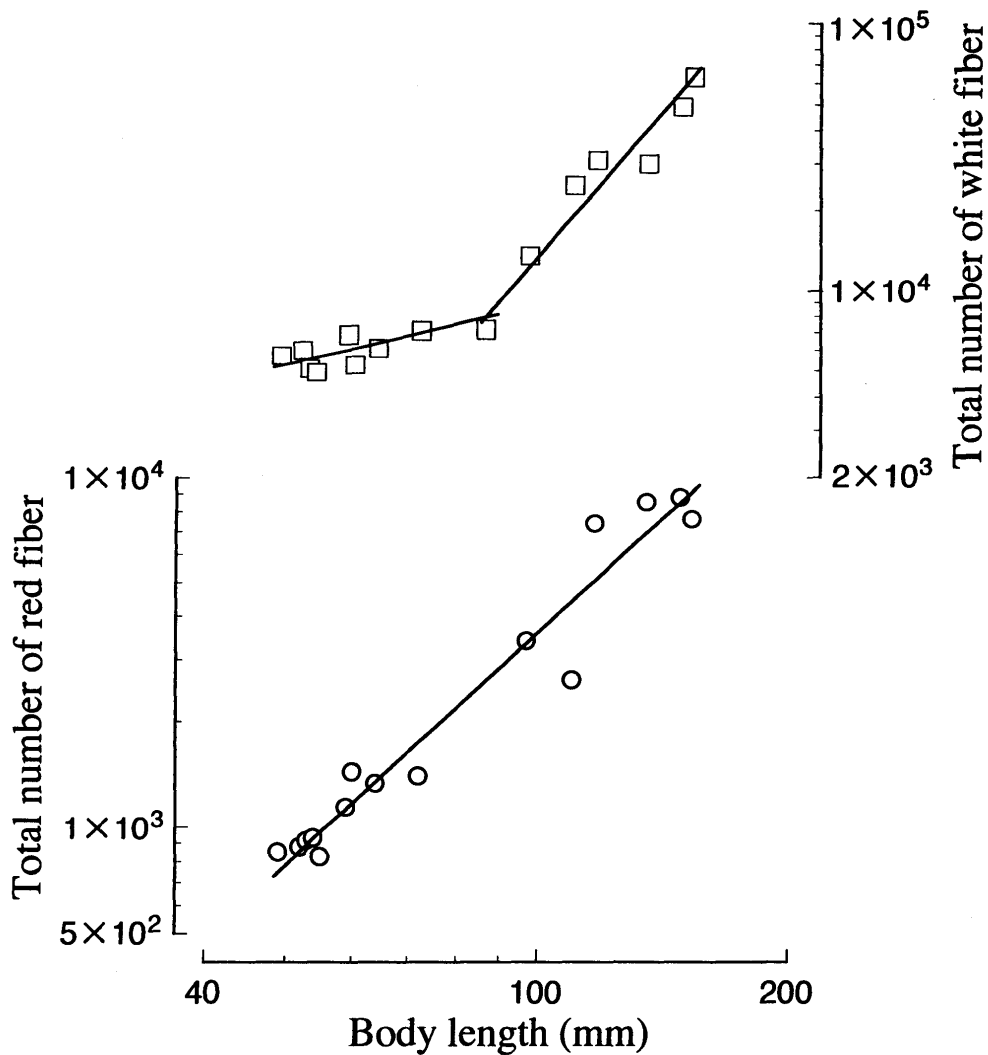


Fig. III-37. The total number of red and white fibers of the Pacific bluefin tuna. ○, red muscle fibers; □, white muscle fibers

III-2-2-3. 考察

筋肉体積の相対成長に屈折点が存在することは他の魚種でも報告されている。マダイでは摂餌開始期に存在し²¹⁵⁾、ニシン、*Clupea pallasii*では仔魚から稚魚への移行期に存在する²¹⁶⁾と報告されている。クロマグロにおいては、稚魚後期に相当する 80 mm BL において屈折点が存在した。

魚類において、全体側筋に占める血合筋の割合は 10% よりも小さいとされている²¹⁷⁾。体側筋に占める血合筋の割合が多いのは、より高い遊泳活動力を有していることと関係している²¹⁸⁾。故に、クロマグロは早い発育段階より遊泳力の高い生活をしていることが示唆される。

クロマグロにおける赤色筋繊維の発達は、筋繊維数の増加と筋繊維の断面積の増加によりもたらされた。赤色筋繊維の断面積は発育に伴って増加し、小さな筋繊維は徐々に消滅した (Fig. III-36)。また、赤色筋繊維数は発育に伴い単調に増加した (Fig. III-37)。85 mm BL までの白色筋繊維は主に断面積の増加により発達した。85 mm BL 以上では、白色筋繊維は筋繊維数および断面積の両方の増加により発達した。しかし、小さな筋繊維は消滅しなかった (Fig. III-36)。

筋繊維の増加機構は未だ明らかにされていない。赤色筋繊維においては、northern anchovy, *Engraulis mordax* を使った実験で大きな筋繊維の分割により筋繊維数が増加するとされている²¹⁹⁾。白色筋繊維では、周辺組織からの筋繊維の出現²²⁰⁾ および筋繊維の部分的な分裂²²¹⁾ により増加するといわれる。

クロマグロの赤色筋繊維数の増加も、大きな筋繊維の分裂によるものと考えられた。なぜなら、赤色筋繊維数の増加に伴って、小さな筋繊維は次第に消滅したからである。一方、白色筋繊維では、小さな筋繊維は消滅せず、様々な大きさの筋繊維が存在した。従って、筋繊維数の増加は、部分的な分裂あるいは派生によるものと考えられた。

体側筋の筋肉体積および白色筋繊維の数量の増加には、80～85 mm BL において屈折点が見られた。この魚体の大きさは、前節で述べたように、稚魚から若魚への移行期に相当する。また、筋繊維断面積は 50 mm BL 付近まで急激に増加し、赤色筋および白色筋ともに 250 mm BL 付近で未成魚の水準に達する。さらに、第IV章で述べるように、若魚期に入ると、飼育水槽におけるクロマグロの遊泳速度は顕著に増加し、遊泳の効率を示す尾鰭の AR および Wc が高速巡航遊泳に適した形状へと変化する³⁸⁾。それゆえ、クロマグロの遊泳能力、特に推進力は概ねこの発育段階で急速に高まるものと考えられる。なお、このように筋肉の発達の変化が、行動的および生理的变化と同時に起こる現象は他魚種でも報告されている^{215, 216)}。

Ⅲ-3. 発育に伴う酸素消費量の変動²⁰⁸⁾

クロマグロは、尾叉長 3 m、体重 500 kg 以上に成長し、大回遊を行うための強力な遊泳力を備えるなど、特異な生物学的特性を有している^{13, 50)}。それゆえ、その養殖には大がかりな施設と特殊な飼育技術が要求される。クロマグロは他の多くの魚種と比べて高い酸素濃度を必要とすることから²²²⁾、酸素供給量が十分な海域で飼育することが肝要である。ところで、養殖用種苗は主として天然産幼魚を曳き縄釣りによって採捕したものをを用いているが、採捕から生簀への活け込みまでは船の活魚槽に収容されて輸送される。種苗生産においては、卵期から稚魚期まで酸素供給量の限られた水槽内で飼育される。

従って、クロマグロの増養殖においては、従来の養殖対象魚に比べて、それぞれの局面で酸素欠乏による大きな減耗を引き起こす危険性が高いと考えられる。これを回避するためには、発育に伴う酸素要求量を知ることが重要である。そこで、自然産卵によって得た受精卵を供試して、卵期から若魚期にかけての酸素消費量の変動を調べた。

Ⅲ-3-1. 材料および方法

(1) 供試魚および飼育方法

供試卵は、近畿大学水産研究所大島分室の網生簀で養成した 1987 年産親魚が 1995, 1996 および 1998 年の 6 月から 8 月にかけて自然産卵したものである。受精卵は卵採集ネットで回収し、白浜町まで約 1 時間 30 分を要して輸送し、近畿大学水産養殖種苗センターの 100 m³ 容コンクリート水槽へ収容した。餌料系列は、Fig. III-38 に示したように、孵化後 2 日目よりワムシを、孵化後 10 日目よりアルテミアのノープリウスおよびインダイの仔魚を、孵化後 20 日目よりカタクチ

イワシ, *Ammodytes personatus* のシラス切断肉をそれぞれ与えた。1995 年における実験期間中の水温は 20.0 から 28.8℃の間で推移した。酸素消費量の測定は、桑実期の卵から孵化後 132 日の若魚に至るまでの間に合計 1,978 尾を供試して行った。供試魚は全長および乾燥魚体重を測定した (Fig. III-38 および 39)。なお、魚体の乾燥重量は 125℃のドライオーブンで恒量となるまでとした。

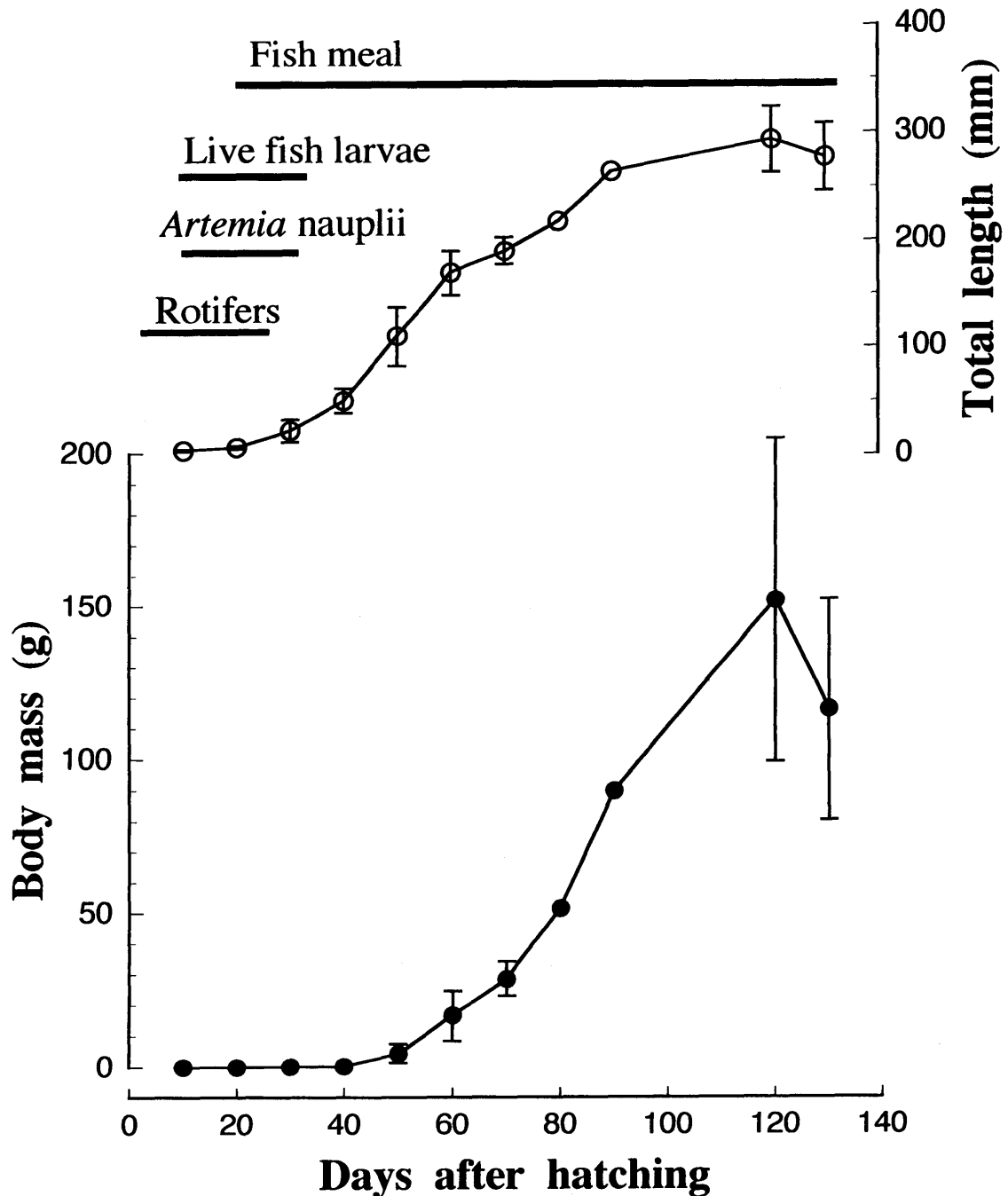


Fig. III-38. Growth and feeding schedule of the Pacific bluefin tuna. ● and ○ indicate the mean of body mass and total length at 10 days intervals, respectively. Vertical bars show standard deviations.

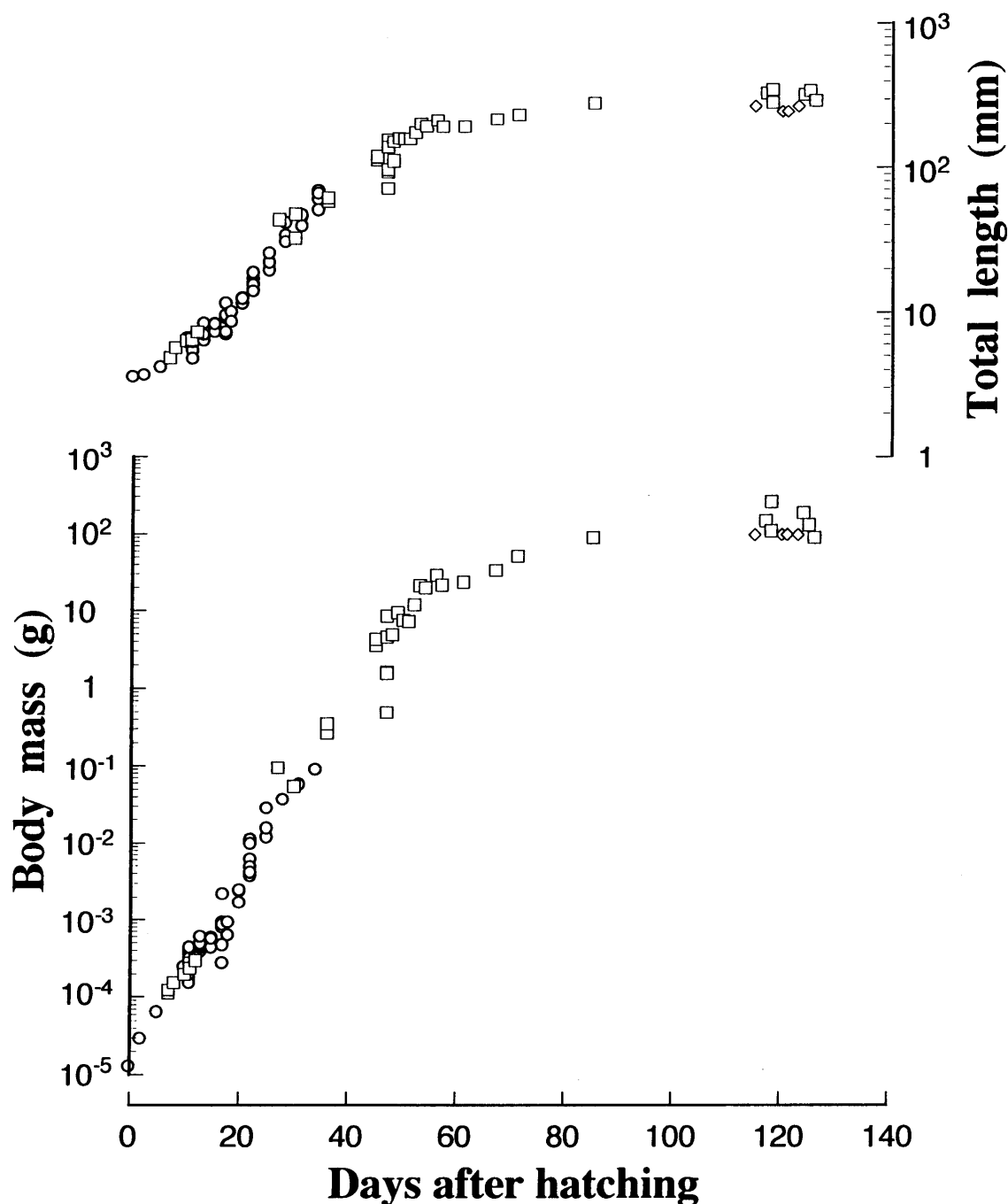


Fig. III-39. Fish used in this experiment at stages after the hatch out. Different symbols of body mass and total length denote different years of spawning: ○, 1995; □, 1996; ◇, 1998.

(2) 呼吸

酸素消費量の測定には、暗下での運動性に応じて2通りの方法を用いた。孵化後25日目までのクロマグロは、暗下でほとんど運動しなかった。従って、この間の酸素消費量はFinnの方法により測定した²²³⁾。供試魚は水温馴致のため、実験を開始する24時間以前に飼育水槽より取り上げて30 l水槽へ収容し、水温25℃に馴致した。馴致後、供試魚は魚体の大きさに合わせて、2～50 ml容ガラス製注射筒に収容後、アルミホイルで被覆し、ウォーターバスに静置した。使用海水は酸素飽和にし、1本の注射筒に収容する卵および魚の数は10個および1～10尾とした。

実験中の水温は 25℃ に保った。測定はいずれの発育段階でも 9 本の測定注射筒と 1 個のブランクで行った。測定時間は 30 から 60 分とし、いずれも酸素濃度が 60% を下らない範囲で測定した。全ての卵が浮上し、あるいは仔稚魚が生存している注射筒における測定結果のみを酸素消費量の解析に使用した。酸素濃度は YSI 社 model 58 にマイクロチェンバーユニットを装着して測定した。

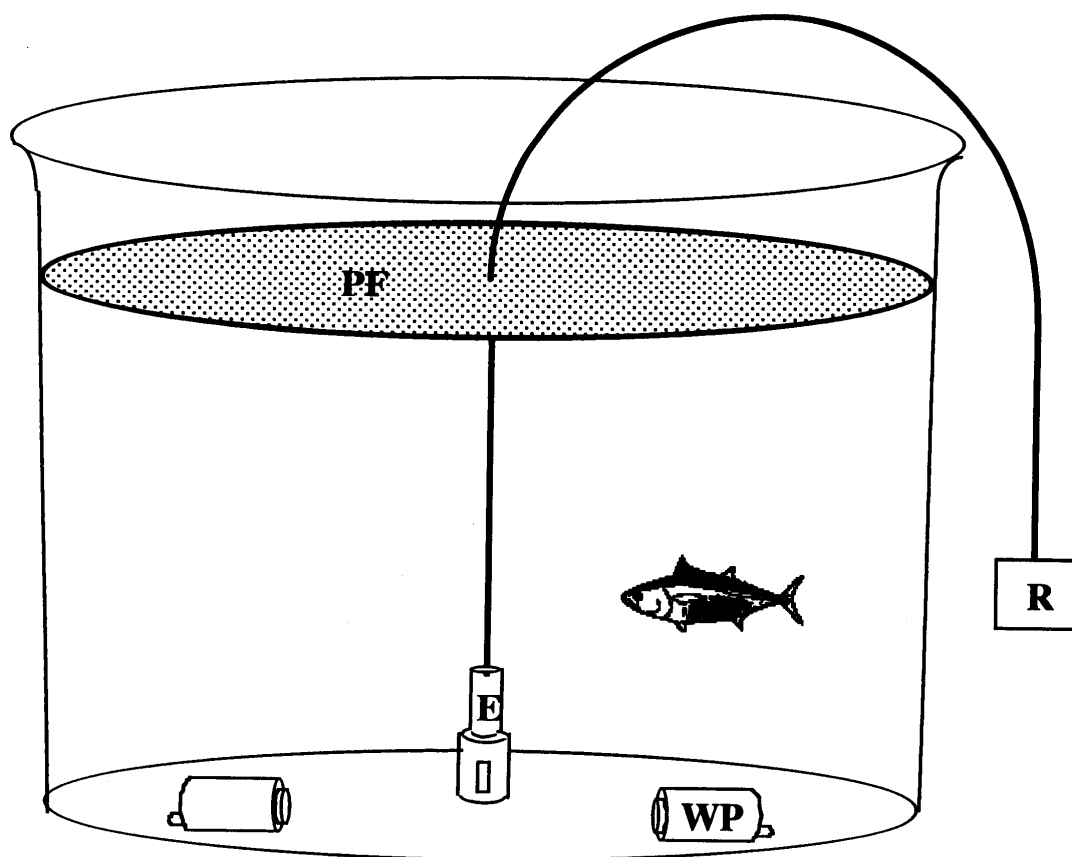


Fig. III-40. A system equipped with an oxygen electrode for measurement of oxygen consumption. The volume of the respiration chamber is 30-1000 cm³. E, oxygen electrode; PF, paraffin cover; R, recorder; WP, water pump to mix water in the oxygen chamber.

孵化後 25 日以降のクロマグロは、暗下でも活発に遊泳した。そこで、酸素消費量の測定には、Fig. III-40 に示すように大型の呼吸容器を用いた。供試魚は注意深く飼育水槽より取り上げ、供試 12 時間前に魚体の大きさに合わせて 30~2,000 l の円筒形実験水槽へ収容した。酸素消費量測定開始までは、25±1℃ の酸素飽和にした濾過海水を継続的に水槽内へ注入した。また、呼吸容器は黒いシートで完全に覆った。水温馴致後、呼吸容器と同径の蓋をし、水槽と蓋の間に流動パラフィンを流し込んで空気中の酸素との接触を防いだ後、呼吸容器内への海水の供給を停止して溶存酸素濃度を測定した。測定を開始してからおよそ 30 分後の呼吸容器内の酸素濃度を測定し、酸素消費量を求めた。

なお、測定時間内の酸素濃度は 60% 酸素飽和を下回らないようにした。酸素濃度の測定には YSI 社の model 59 を用いた。

Ⅲ-3-2. 結果

(1) 形態発育

クロマグロ卵は産卵後 4, 10, 15, 19, 27 および 36 時間後に、それぞれ桑実期、胞胚期、胚楯出現期、クッパー胞出現期、心拍開始および孵化直前に達した。卵は産卵 37 時間後に 50% が孵化した。卵径は 1.02 ± 0.01 mm で、卵の乾燥重量は、胚楯出現期に測定したところ 0.47 ± 0.01 mg であり、他のステージでも変わらなかった。

孵化後 2 日目に口と肛門が開き、目がやや着色し始め、卵黄がほとんど消失した。孵化後 4 日目には口が完全に開き、目が完全に黒化した。孵化後 13 日目には、歯が両顎に形成され flexion 期に達した。孵化後 17 日目には、脊索の末端が上屈し、尾鰭の鰭条数が定数に達した。孵化後 22 日目には全ての鰭の条数が定数に達し、稚魚へ移行した。孵化後 40 日目には、8 つの小離鰭が完全に独立した。

(2) 発育に伴う酸素消費量の変動

卵期： 卵 1 個あたりの酸素消費量 M は、桑実期からクッパー胞出現期まで有意に変化せず 1.7×10^{-4} から 5.6×10^{-4} であった (Fig. III-41)。その後、 M は心拍開始期から孵化直前にかけて 9.5×10^{-4} から 4.0×10^{-3} へと有意に増加した。

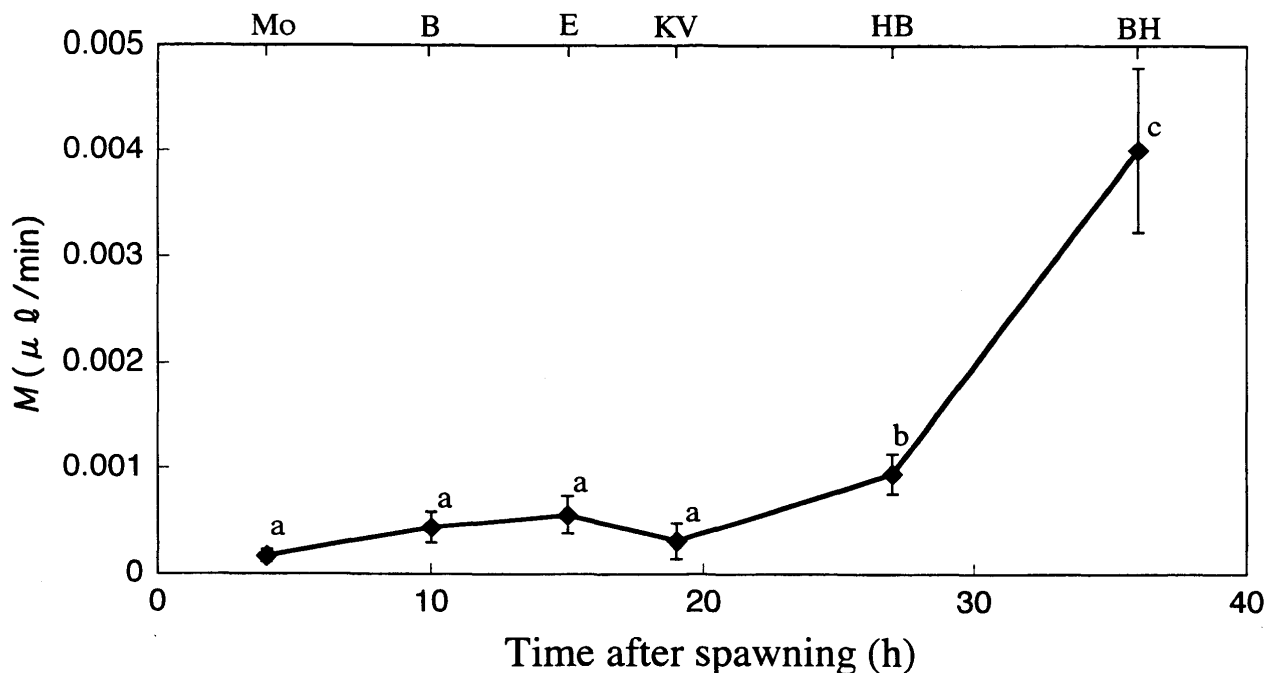


Fig. III-41. Changes in oxygen consumption (M) and time after spawning in the course of development of the Pacific bluefin tuna. Vertical bars show standard deviations. Different letters mean a significant difference between the test groups ($p < 0.05$). Abbreviations of developmental stage: Mo, morla; B, blastula; E, embryo appearance; KV, Kupffer's vesicle appearance; HB, heart beating; BH, just before hatching.

仔魚から若魚： 孵化後の M と乾燥魚体重 W の関係は一般に次式で表される。

$$M = aW^b$$

$$\text{Log} M = \text{log } a + b \text{ log } W \quad (a, b \text{ は定数})$$

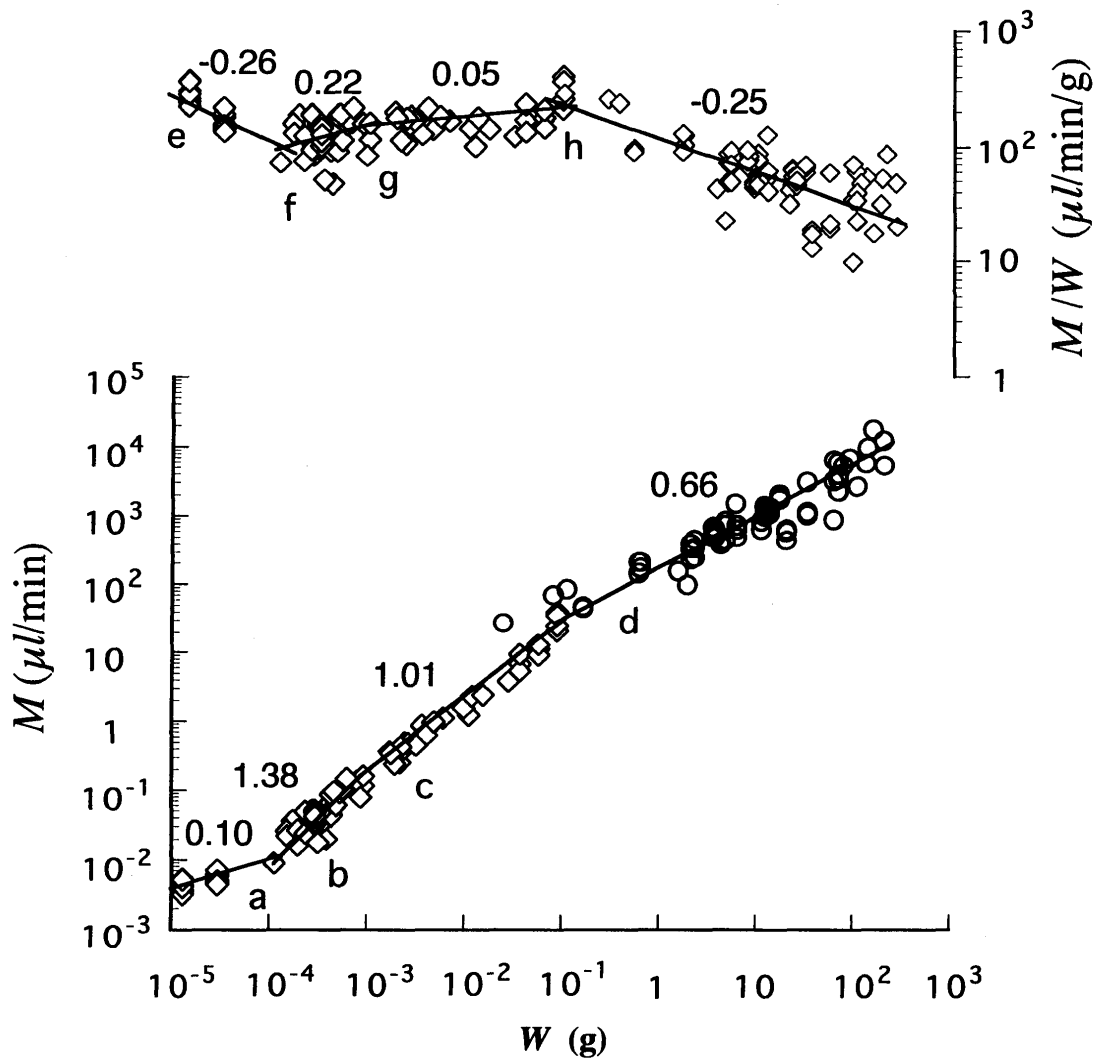


Fig. III-42. Allometric relationship of oxygen consumption (M) to body mass (W). Figures by the regression lines indicate the slope of the lines or the b and $b-1$ value in the allometric equations $M=aW^b$ and $M/W=aW^{b-1}$, respectively (\diamond , syringe method; \circ , respiration tank method). Different letters mean significant differences between the test groups ($p<0.05$).

孵化後のクロマグロの発育に伴う酸素消費量の変動は、魚体重に対して Fig. III-42 に示すように4相のアロメトリーを形成した。それぞれの相で、アロメトリーは最小二乗法で描かれた近似直線で示された。それらの直線の屈折点は主観的に決定したが、それぞれの線に統計的有意差があった。3つの屈折点は前出の方法より求めたところ、 $6.5 \times 10^{-5} \text{ gW}$ 、 $7.0 \times 10^{-5} \text{ gW}$ および $8.0 \times 10^{-5} \text{ gW}$ に存在した。

第1相の 3×10^{-5} から $6.5 \times 10^{-5} \text{ gW}$ では、 M は W に対して緩やかに増加した。従って、単位重量当たりの酸素消費量 M/W は W の増加に伴い減少した。

第2相の $0.7 \times 10^{-4} \text{ gW}$ から $0.9 \times 10^{-4} \text{ gW}$ では、 M は b が 1.38 の単調増加を示し、 M/W は魚体の大きさに関わらず概ね一定であった。

第3相の $0.9 \times 10^{-4} \text{ gW}$ から $0.5 \times 10^{-1} \text{ gW}$ では、 M は b が 1.01 の単調な増加を示し、 M/W は魚体の大きさに関わらず概ね一定であった。

第4相の 0.05 gW から 254 gW では、 M は b が 0.66 と緩やかな増加を示し、 M/W は魚体重の増

加に伴い減少した。

Ⅲ-3-3. 考察

クロマグロ卵の酸素消費量は心拍開始期以降で有意に増加した。同じ発育段階におけるその増加は、他の魚種でも Atlantic halibut, *Hippoglossus hippoglossus*²²³⁾, gilthead sea bream, *Sparus aurata*²²⁴⁾ で報告されている。酸素消費量の増加するこのステージにおいて、主なエネルギー源とされるトリグリセライド、および必須のエネルギー源とされる遊離アミノ酸が減少しており¹²³⁾、酸素消費量と FAA 量の減少はよく一致した²²³⁾。従って、形態発育とクロマグロの酸素消費量に相関関係があると考えられる。孵化後、個体あたりの酸素消費量と魚体重の相対成長は、クロマグロの形態変化、生理的な変化および遊泳行動の変化と一致した。最初の屈折点は孵化後 5 日目にあり、内部栄養から外部栄養への移行期に相当した。この屈折点では、クロマグロはワムシを摂餌し、他魚種の仔魚に多く見られる anguilliform 型の遊泳行動を行った²²⁵⁾。この発育段階までに、内部栄養から外部栄養への移行に合わせ³⁵⁾、初期の消化器官の発達、トリプシン様酵素、ペプシン様酵素およびアミラーゼなどの活性増加が認められた¹⁵⁵⁾。従って、クロマグロ仔魚の個体あたりの酸素消費量の増加は、活発な運動および食物の消化に費やす代謝の増加によるものと考えられる。

第 2 の屈折点は脊索が完成する postflexion 期に一致した。第 3 の屈折点は仔魚から稚魚への移行期に一致した。この発育段階において、クロマグロは活発に遊泳し、アルテミア幼生やインダイ仔魚を摂餌した。第 1 から第 2 の屈折点にかけて、消化器官は次のように発達した。胃の消化腺が出現しその数が増加し、幽門垂が出現して、上顎骨および咽頭骨の数量およびサイズに増加が見られた³⁵⁾。また、ペプシン様酵素の活性は増加し、胃はこの発育段階より機能化した¹⁵⁵⁾。

第 3 の屈折点では魚は魚群を形成し、一日中活発に活動するようになった。夜間は、日中に比べて遊泳速度が遅くなったが、群は維持されていた。日中は活発に摂餌し、特に魚肉を好んで摂餌するようになり、供試魚はどれだけ安静に維持しようと努めても自由かつ活発に遊泳した。そこで、この発育段階からの酸素消費量の測定には、大型の呼吸容器によるもう一方の方法を用いた。なお、酸素消費量は遊泳行動が安静状態であるときのみ測定した。

マグロのようなラム換水の魚と、マダイのような鰓換水²²⁶⁾の魚との酸素消費量を比較するのは困難である²²⁷⁾。それは、ラム換水の魚類は酸素を得るために常に泳がなければならないからである。それに加え、魚種間での酸素消費量の差は、測定方法や水温により影響を受ける²²⁸⁾。しかし、養魚における環境管理は重要であり、他の魚種、たとえばマダイの酸素消費量について、通常飼育される水温条件下における安静状態で比較することは意義深い。

そこで、クロマグロの酸素消費量を他の魚種と比較したところ、卵期では gilthead sea bream²²⁴⁾と同等であった。クロマグロ卵の酸素消費量は、胚楕期においては、gilthead sea bream よりも低かったが、孵化直前には高くなった。前期仔魚から後期仔魚期への移行期に相当する発育段階では、マダイ仔魚²²⁹⁾とほぼ同等の酸素消費量を示した。後期仔魚期以降の段階では、クロマグロとマダイの酸素消費量の差は急速に広がった。稚魚期への移行期には、クロマグロの酸素消費量は $0.4 \mu\text{l}/\text{min}$ となり、マダイの 4 倍にも達した。

稚魚期以降の魚体重当たりの酸素消費量は、個体当たりの酸素消費量が増加するにも関わらず減少したが、この現象は他の魚種でも一般的に知られ²³⁰⁾、よく議論されてきた²³¹⁻²³³⁾。板沢およ

び及川はこの現象について、代謝の低い組織が発育に伴い増大するためであるとしている²³⁴⁾。クロマグロにおける各組織の代謝量およびその割合の変化については、未だ調べられていない。しかし、嫌氣的代謝を行う普通筋の割合が、魚体重当たりの酸素消費量が減少する体長 10 cm 前後の時期に増加している²³⁵⁾。すなわち、嫌氣的な組織の増加がクロマグロにおいても、このような変化を生み出したものと考えられる。

ところで、先に述べたように、養魚における大量斃死は酸素不足に因ることが多く、その防止策を講じるためには、魚種の違いによる致死酸素濃度とともに酸素消費量を知っておく必要がある。本実験の結果から得られたクロマグロの酸素消費量を、他魚種における既往の知見と比較する場合、 M/W は体重の増加に伴って減少することから、同サイズで比較しても、魚種によって異なる成長量の差によって発育段階に違いが生ずるので、厳密な比較はし難い。また、水温によっても異なるものと考えられる。しかし、参考までに、山元ら²³⁶⁻²⁴²⁾が多くの魚種で調べた結果と比較したところ、クロマグロの M/W はそれらのすべての魚種より著しく高かった。それらのうち、養殖魚のいくつかを挙げて Table III-14 に示したが、日本の代表的な養殖魚の一つで、酸素消費量が高いといわれるブリ²⁴²⁾では、体重 86.6 ± 17.6 g, 全長 20.4 ± 1.2 cm の大きさに 4.96 ± 0.67 ml/min · kg (水温 26°C) であるのに対して、クロマグロでは、ほぼ同サイズの体重 86.1 ± 9.2 g, 全長 18.1 ± 0.5 cm で 14.96 ± 3.30 ml/min · kg (26°C) であり約 3 倍も高い。

また、酸素消費量の測定に用いた装置を使い、体重 40.3 ± 13.4 g の人工孵化クロマグロ 5 尾について致死酸素濃度を測定したところ、 2.77 ± 0.48 ml/l となった。前述のブリ²⁴²⁾の致死酸素濃度が 1.73 ± 0.09 ml/l であるから 1 ml/l 以上も高い。ゆえに、クロマグロを飼育する場合の酸素欠乏による死亡事故の確率は、多くの既往の養殖魚よりもかなり高いということがいえる。しかし、種苗生産および養成における飼育技術や施設は、ブリやマダイのそれに準じているのが現状である。本研究の結果は、クロマグロの飼育には酸素供給能力の増強が重要であることを示唆し、養殖漁場の選択、種苗生産における飼育過程、稚魚の沖出しおよび幼魚の輸送に当たっての有用な指標になるものと考えられる。

Table III -14. Oxygen consumption (M/W) of teleost under resting

| Fish species | Body weight (g) | Total length (cm) | Water temperature (°C) | M/W (ml/min/kg) | Source |
|--|-----------------|-------------------|------------------------|-------------------|---|
| Pacific bluefin tuna, <i>T. thynnus orientalis</i> | 86.1 ± 9.20 | 18.1 ± 0.5 | 26.0 | 14.96 ± 3.30 | Present study |
| Yellowtail, <i>Seriola quinqueradiata</i> | 86.6 ± 17.6 | 20.4 ± 1.2 | 26.0 ± 0.2 | 4.96 ± 0.67 | Yamamoto et al. (1990) ^{*6} |
| Tilapia, <i>Sarotherodon nilotica</i> | 5.6 ± 1.9 | 5.8 ± 0.7 | 27.2 ± 0.9 | 4.65 ± 1.10 | Yamamoto and Takadono(1985) ^{*7} |
| Ayu, <i>Plecoglossus altivelis altivelis</i> | 64.3 ± 6.9 | 19.3 ± 0.7 | 26.4 ± 1.1 | 3.88 ± 0.72 | Yamamoto and Takadono(1985) ^{*7} |
| Tiger puffer, <i>Takifugu rubripes</i> | 18.3 ± 4.0 | 9.3 ± 1.2 | 25.7 ± 0.4 | 3.64 ± 0.38 | Yamamoto et al. (1990) ^{*6} |
| Red sea bream, <i>Pagrus major</i> | 200.0 ± 31.0 | 22.9 ± 1.2 | 26.6 ± 0.3 | 2.14 ± 0.23 | Yamamoto et al. (1987) ^{*8} |
| Scorpion fish, <i>Sebastiscus marmoratus</i> | 8.6 ± 2.1 | 7.9 ± 0.9 | 26.1 ± 0.1 | 2.01 ± 0.25 | Yamamoto et al. (1990) ^{*6} |
| Carp, <i>Cyprinus carpio</i> | 51.4 ± 8.7 | 17.0 ± 1.0 | 26.8 ± 0.4 | 1.19 ± 0.14 | Yamamoto and Hirano(1988) ^{*9} |
| Japanese eel, <i>Anguilla japonica</i> | 79.8 ± 24.5 | 39.9 ± 3.1 | 26.8 ± 0.1 | 1.08 ± 0.27 | Yamamoto and Takadono(1985) ^{*7} |

第Ⅳ章 稚魚期以降の突進遊泳と衝突死^{243, 244)}

第Ⅲ章の仔稚魚の発育に関する種々の実験のために飼育を行ったところ、クロマグロの初期飼育および中間育成には、大きな減耗期が3段階にわたって認められた。すなわち、仔魚の生残数は孵化後10日間で60~90%減少する。次に、孵化後およそ12日目頃から共喰いが始まり、結果として比較的的小型の仔魚の減耗が生じる。そして孵化後30日目以後、稚魚期および若魚期の段階で養成施設への衝突によって起こる損傷により高い死亡率が認められ、容積100 m³以下の水槽で飼育を継続すれば、孵化後数ヶ月以内にすべて斃死する場合が多い。第Ⅲ章1-2節で述べたように、種苗生産を行っている既往の海産魚種では、第1および第2の減耗期は一般的に認められるが、稚魚期以降の衝突死については全く認められない現象である。

ところで、クロマグロの養殖用種苗生産では、魚が大きなサイズに成長するので、他の海産魚で必要とされるような大量の種苗（例えば日本におけるマダイのような何千万尾もの種苗）²⁴⁵⁾を生産する必要はない。従って、初期飼育の間の生残率が高くないとしても、中間育成期間の減耗が少なければ、産業規模の養殖に十分な量の種苗を生産することは可能である。また、放流用の種苗生産についても、初期飼育における減耗を如何に防除したところで、体長50 mm以上で放流しようとするれば、稚魚期以降の著しい減耗によって目的は達せられない。故に、クロマグロの種苗生産においては、先に挙げた3つの減耗期のうち、第3の段階、すなわち、初期飼育後期から海面網生簀における中間育成時の衝突死防除策が最優先課題と考える。

クロマグロの突進遊泳による衝突死は、養殖用種苗として活け込む全長200~400 mmの天然産ヨコワおよび成魚にも時としてみられ、葛西水族園でも陸上水槽における未成魚・成魚飼育において認められている²⁴⁶⁻²⁴⁸⁾ので、クロマグロに普遍的な特性と考えられるが、その頻度はいずれも種苗生産過程におけるそれに比べると著しく低い。なお、全長200 mm以下の天然産クロマグロの飼育事例は皆無である。ゆえに、人工孵化クロマグロの中間育成段階における衝突死多発は、人工飼育による餌料の栄養的欠陥に起因する神経系疾病も可能性としては考えられるが、先に述べたように成魚でも時にみられる現象であることから、クロマグロに特有の現象で、しかも発育過程の一時期に特に著しく認められる特性に起因する可能性が高い。衝突死の直接の原因は、驚愕反応による突進遊泳を行った場合に、障害物を回避できないことにありと推察される。従って、この防除対策を講じるためには、遊泳に関する外部形態と内部形態および感覚系や神経系組織の発達など、多面的な研究が必要である。

本研究では、遊泳運動における推進力と制御能力のそれぞれに関係の深い外部器官の発達過程を調べるとともに遊泳行動を観察し、衝突原因を検討した。

Ⅳ-1. 遊泳行動およびその能力に関する外部器官の形態変化²⁴⁴⁾

遊泳運動能力²⁴⁷⁾をその機能から分類すると、推進力と体勢の維持や旋回あるいは停止などの制御能力に大別できると考えられる。前者に関係の深い組織および器官は体側筋と尾鰭であり、後者に関係の深い器官は尾鰭以外の各鰭である。また、尾柄隆起縁 (caudal keel) は、体側筋と

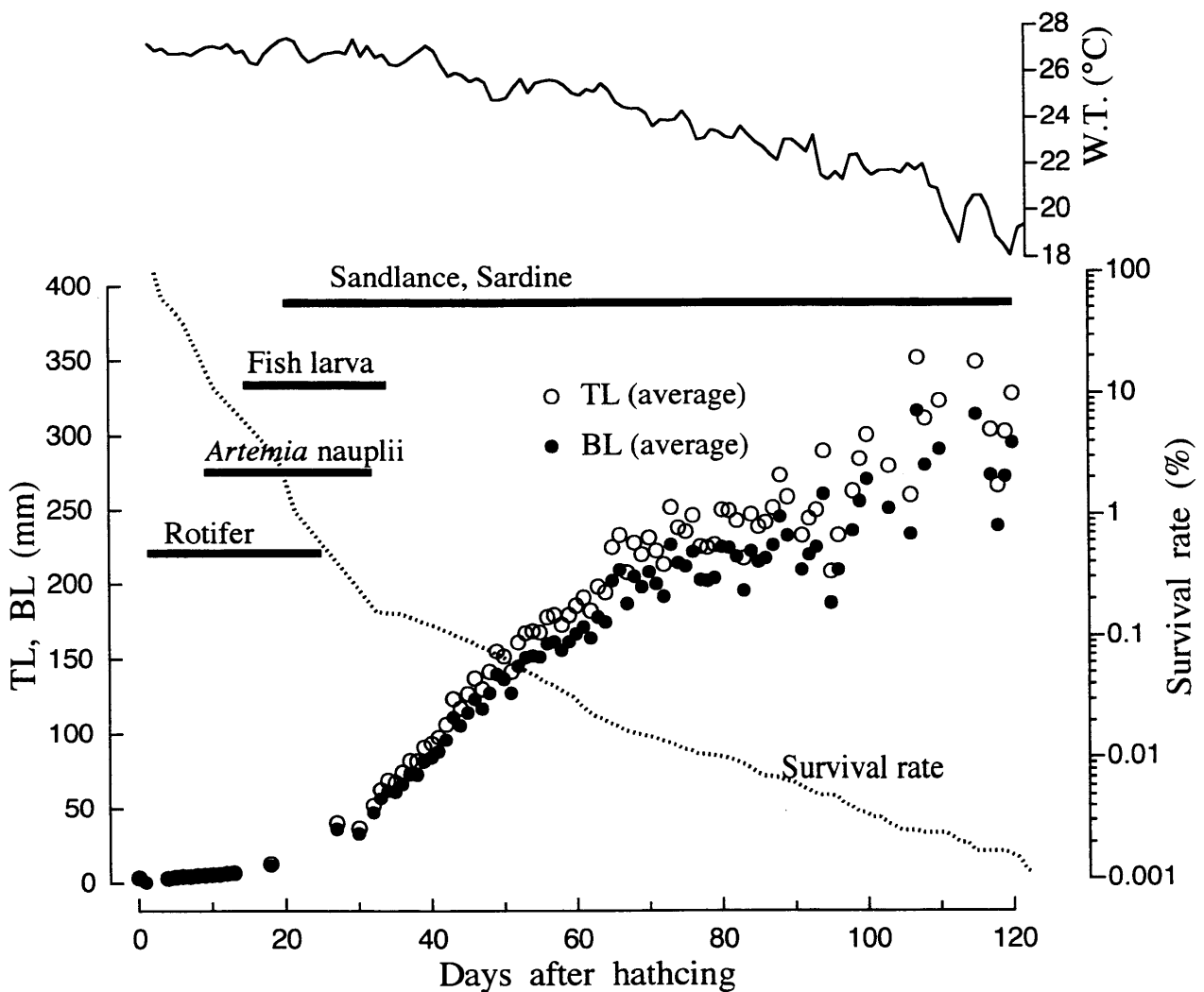


Fig. IV-1. Growth, feeding schedule, survival rate, and rearing temperature of the Pacific bluefin tuna, in the indoor culture experiment (1996).

尾鰭の連結部の補強とともに、揚力獲得および抵抗軽減という機能から考えると、間接的に両者に関わりがある²¹⁷⁾。これらのうち、体側筋については第Ⅲ章２節で調べたので、その他の諸器官について、稚魚から若魚期までの成長に伴う形態の変化を調べた。また、これら器官の発育に伴う遊泳行動の変化についても観察した。

IV-1-1. 材料および方法

(1) 供試魚

実験には、1987年級群クロマグロの親魚（満9歳）が1996年8月12日に自然産卵した受精卵を孵化させて用いた。同日に採取した受精卵140万粒のうち100万粒を、自動車で1時間30分を要して白浜の近畿大学水産養殖種苗センターへ輸送し、縦横7.2 m、深さ2 m、容積100 m³の飼育水槽へ収容した。仔魚は8月14日午後10時頃に孵化した。本実験では孵化後24時間を0日として日齢を計算した。

初期飼育および実験期間中にわたる水温は、孵化後30日目まで26～28℃であったが、以後時間の経過とともに実験終了時（1997年1月）の18℃まで徐々に低下した。飼育餌料には、孵化

後3～25日目までワムシを、10～31日目までアルテミアのノープリウスを、14～32日目まではイシダイの孵化仔魚を、20～120日目までは切断魚肉（イカナゴまたはイワシ類）を、それぞれ用いた（Fig. IV-1）。

孵化後30日目には、全長30～45 mm（平均36.7 mm）に育った約1,200尾の生存魚を600尾ずつ大小2群に分け、八角形の80 m³容飼育水槽（水深1.5 m）2基に收容した。通常の種苗生産としては、この時点で中間育成の段階に入り、海面網生簀に沖出しするが、衝突による減耗の実態を究明するために、観察し易い陸上水槽での飼育を続行したものである。飼育水槽には、衝突の衝撃を緩和させるために青色ポリビニールシート水槽を使用し、コンクリート水槽内の内壁および底面から約30 cm離れた位置に固定設置した。シート水槽の中央底部には、排水および排泄物除去などのために2×2 mのモジ網（目合い0.5 cm）を取り付けた。飼育室の屋根は不透明ビニールシート葺きで、この上を遮光率80%の寒冷紗で覆った。日中の人工照明は用いず、夜間は水面から70 cm上方に10ワットの常夜灯を点灯させた。

このようにして飼育する間、孵化後30～160日目までの毎日、死亡魚を確認次第速やかに採り上げて計数するとともに、体各部の測定を行った。それらの個体（1,192 標本）は、一部を10%ホルマリン液で固定し、その他は-30℃で凍結保存し、遊泳能力に関する外部諸器官の計測に供した。計測にあたっては1尾ごとに躯間部、尾部および各鰭をそれぞれCCDカメラで撮影し、その映像をパーソナルコンピュータ（Apple 社製 PowerMacintosh 7600）内に画像情報として保存した。また、未成魚との比較を行うため、網生簀に活け込んで養成中の天然産2歳魚（体長1,000～1,200 mm）10尾も同様に処理し画像として保存した。

(2) 遊泳推進力に関する外部器官

尾鰭の形状 多くの魚で尾鰭は最も重要な推進器官であり、その機能は流体力学的な観点から多数検討されている。本研究では尾鰭の推進力の指標として Nursall が提唱したアスペクト比 (AR)²⁴⁹⁾、および尾鰭の形状分類として Aleyev が提唱した尾鰭形状指数 (W_c)²⁵⁰⁾ を用い、クロマグロの発育に伴う形態変化を調べた。アスペクト比は翼幅の2乗を翼面積で割った値で定義され (Fig. IV-2)、主として尾鰭に関する縦横の長さの比を示し、その値が大きくなるほど尾鰭が縦長になる傾向がある²⁵¹⁾。一方、 W_c は尾鰭において魚体の正中線から上下に最も遠い点をそれぞれ X、Y として、その2点を結んだ直線によって区切られた魚体に近位部分を A、遠位部分を B、さらに A の中で凹入した部分を C としたとき、

$$W_c = (A \text{ 面積} + B \text{ 面積} - C \text{ 面積}) / A \text{ 面積}$$

と定義される (Fig. IV-2)。 W_c は主として尾鰭の形状を示し、団扇形の尾鰭では W_c は高く、2叉型の後退翼の尾鰭では低くなる。

アスペクト比については体長 (BL) 19～300 mm の420個体、 W_c の測定には12～175 mm BL の220個体の画像をそれぞれ用いて、画像解析ソフトウェア NIH-Image²⁵²⁾ によって体長、翼幅および翼面積を測定した。また、1,000～1,200 mm BL の未成魚個体10尾についても同様の測定を行った。

統計分析 最小二乗法により区間ごとの回帰直線を求めた。回帰直線の有意性について検討するため、 t 分布表より回帰直線が95%信頼区間内にあることを確認した。区間ごとの回帰直線の有意差についても、 t 分布表より傾きの差について5%危険率で検定した⁹⁷⁾。

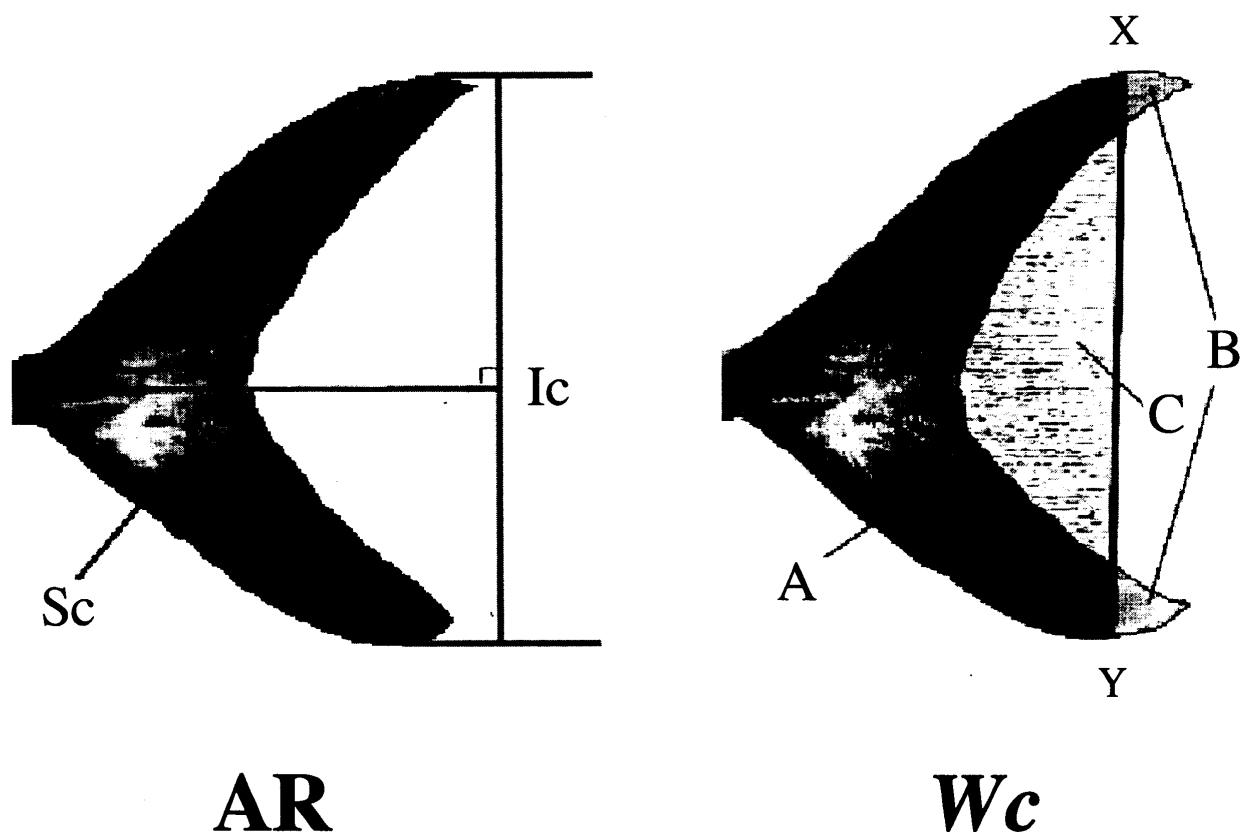


Fig. IV-2. Aspect ratio (AR) and caudal fin shape Index (Wc). $AR = Ic^2/Sc$, $Wc = (A+B-C)/A$.

遊泳速度 遊泳行動の観察は目視による外，赤外線暗視装置（HOGA 製 IRCVM-50S）を用いて行った。暗視装置は，250 W ハロゲンライトの前面に 840 nm 前後の赤外光を主に通すフィルターを装着した赤外線投光器 9 台，赤外域と近赤外域に感度を持つ赤外線ビデオカメラ 2 台，および長時間録画が可能なタイムラプスビデオレコーダー（Panasonic 製 AG-6124）2 台を用いて構成し，Fig. IV-3 に示すように設置した。赤外線暗視装置および赤外線ビデオカメラは水面上 1 m に取り付け，ビデオレコーダーは室内に設置した。この暗視装置 1 台の撮影可能範囲は，水深 1～2 m，半径 3～5 m であった。この装置を用いて，50 mm BL（30 日齢）から 300 mm BL（120 日齢）に成長する間に，早朝を中心として 360 時間にわたって昼夜の遊泳行動をビデオテープに記録した。この録画映像を用いて，発育に伴って変化する巡航速度の日周変化を計測した。平均体長 50 mm（30 日齢），120 mm（同 45）および 300 mm（同 120）付近におけるそれぞれの日の出 30 分前，日の出，正午，日没および午前 0 時における映像を抽出し，1 秒当たり 60 枚の画像に分解してパーソナルコンピュータ（Apple 社製 Power Macintosh 7600）に入力し，画像解析ソフトウェア NIH-Image を用いて 1/60 秒毎の移動距離を求めた。1 個体につき少なくとも 30 コマを測定し，その距離の平均値から 1 秒間の移動距離を求め巡航速度（ W_a cm/s）とした。また，この値から体長当たりの遊泳速度（ W_{aL} ，BL/s）も算出した。

次に，成長に伴って変化する巡航速度と，その時の尾鰭振動数（ ν ，Hz）を計測した。計測した発育段階は，平均 BL 50，120，130 および 300 mm（30，45，50 および 120 日齢）である。移動距離の測定に用いた映像は，最も人為的的刺激要因が少ないと考えられる深夜（午前 0 時前後）に巡航遊泳を行っている時のもので，これらの映像の中から任意に数秒間抽出して測定した。尾鰭振動数は，巡航速度測定時の同映像を 1 秒当たり 60 枚の画像に分解し，左右往復 1 振動を 1

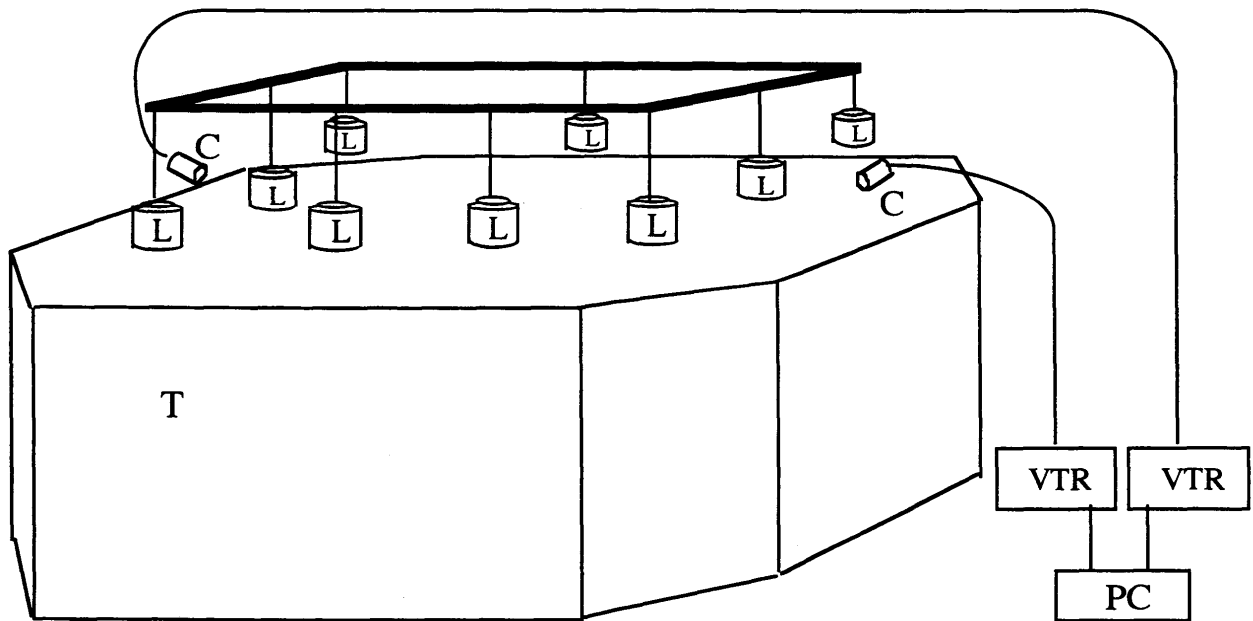


Fig. IV-3. Illustration of night viewer system. L, Infrared light; C, Infrared video camera; VTR, Timelapse video recorder; PC, Personal computer; T, 80m³ rearing tank.

回と数え、1秒間あたりの回数、 ν (Hz) とした²⁵³⁾。

また、同様に突進速度を計測した。突進速度 (burst speed) は魚が発揮する速度の内、最大のもので定義されるが、この遊泳速度はごく短時間しか維持できないことから、計測時間がわずかに違えば突進速度 (W_b) の値は大幅に変化する²¹⁷⁾。Blaxter は実用的意味を考えて、1秒から数秒間維持する速度と定義した²⁵⁴⁾。ところで、驚愕反応時の魚にみられる、体をC字型に屈曲させ急発進する“C-start”と呼ばれる動作⁸⁾ からもたらされる遊泳速度は、Blaxter の提唱した突進速度の定義にほぼ一致すると考えられる。本実験では、平均体長 50, 120 および 300 mm における遊泳のビデオ記録から、突進遊泳と認められる映像を選び出し、巡航速度の計測と同様の方法で、1秒あたりの移動距離を示す突進速度 (W_{ba} , cm/s) を求め、 W_b を体長比で示した体長比突進速度 (W_{bb} , BL/s) を算出した。従って、本実験における突進速度とは何らかの刺激に驚愕して突進した時のものである。

解析方法 発育に伴う ν , W_{ca} , W_{cb} , W_{ba} および W_{bb} の変化について Kruskal-Wallis 検定⁷⁷⁾ により 1% の危険率で有意差を判定した。また、発育段階間で有意差が見られた場合、さらに Mann-Whitney 検定⁷⁷⁾ を用いて 1% の危険率で有意差判定を行った。

(3) 遊泳制御能力に関する外部器官の形態変化

対鰭である胸鰭および腹鰭は方向転換の際にブレーキや舵の役目をし、前者は揚力を得る働きもある。不對鰭である背鰭および臀鰭は体の安定を保つとされる。また、尾柄隆起縁は揚力獲得および抗力軽減の機能がある²¹⁷⁾。なお、尾柄主隆起縁はその機能から推進力にも関与しているが、揚力獲得によって旋回など回避行動時の鰭の負担を軽減できると考えられるので、本研究における衝突原因究明の目的から「制御能力」の項に分類した。遊泳における制御機能を有するこれら諸器官について、稚魚期以降の発育に伴う形態変化を調べ、推進力に関する形態変化、すなわち、推進力獲得経緯と対比して制御能力獲得経緯について検討した。

これら器官の能力の発達過程を表す指標としては、質的な変化も重要であるが、本研究では、それは形状の変化に伴うものとみなした。測定項目は、各鰭については基底長、鰭長および鰭面積、尾柄主隆起縁については左右の総面積とし、それぞれ前項と同様の方法で、17.3～256.6 mm BL の範囲の 274 個体について測定した。また、天然産の養成クロマグロと比較するため、成魚を含む 149.0～2,152.0 mm BL 範囲の 92 個体についても測定した。統計処理方法については前項と同様である。

IV-1-2. 結果

(1) 遊泳推進力に関する外部器官の形態変化

発育に伴う尾鰭の形状変化を Fig. IV-4 に示した。20 mm BL (20 日齢前後) では鰭全体が丸みを帯び、しなやかで透明であった。55 mm BL (30 日齢前後) では、鰭の末端がやや尖り、鰭の辺縁からやや黒化し始めた。105 mm BL (40 日齢前後) では、鰭の末端が鋭角となり、辺縁を中心として黒く硬質化した。270 mm BL (125 日齢前後) に達すると全体が鎌状に変化し、完全に黒色で硬質化した鰭となった。1,000 mm BL (養成 2 歳魚) になると、尾鰭はさらに鎌状となり、硬質化するとともに弾力性を備えた。

発育に伴う尾鰭面積の体長に対する割合の変動と AR の変化を Fig. IV-5 および Fig. IV-6 に示した。尾鰭面積の体長に対する割合は、100 mm BL まで減少傾向にあった。その後、160 mm BL まで同水準で推移した後、300 mm BL まで増加傾向を示した。天然産幼魚から養成した 800～1,300 mm BL の個体の、尾鰭面積の体長に対する割合は、本研究における 160～200 mm

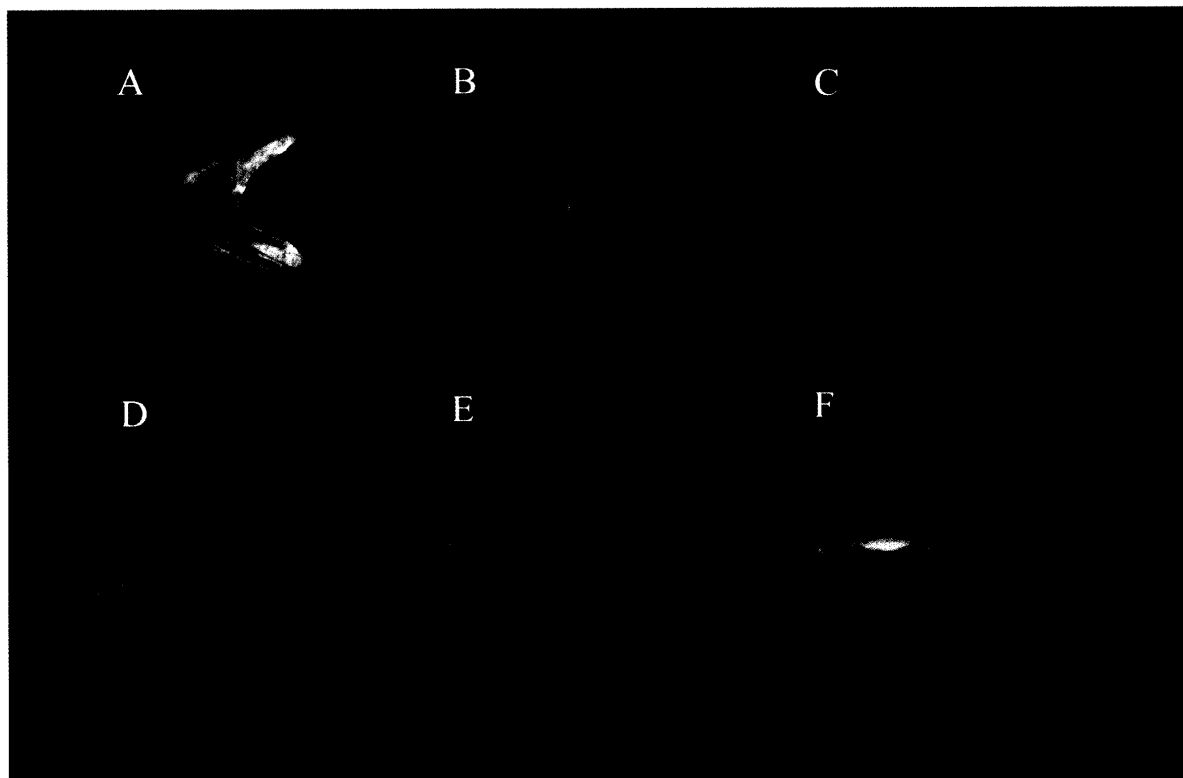


Fig. IV-4. Ontogenetic change in caudal fin shape of the Pacific bluefin tuna. A, 55 mm BL ; B, 100 mm BL; C, 143 mm BL; D, 195 mm BL; E, 250 mm BL; F, 300 mm BL. Scale bar indicate 1 mm for A, and 10 mm for B-F.

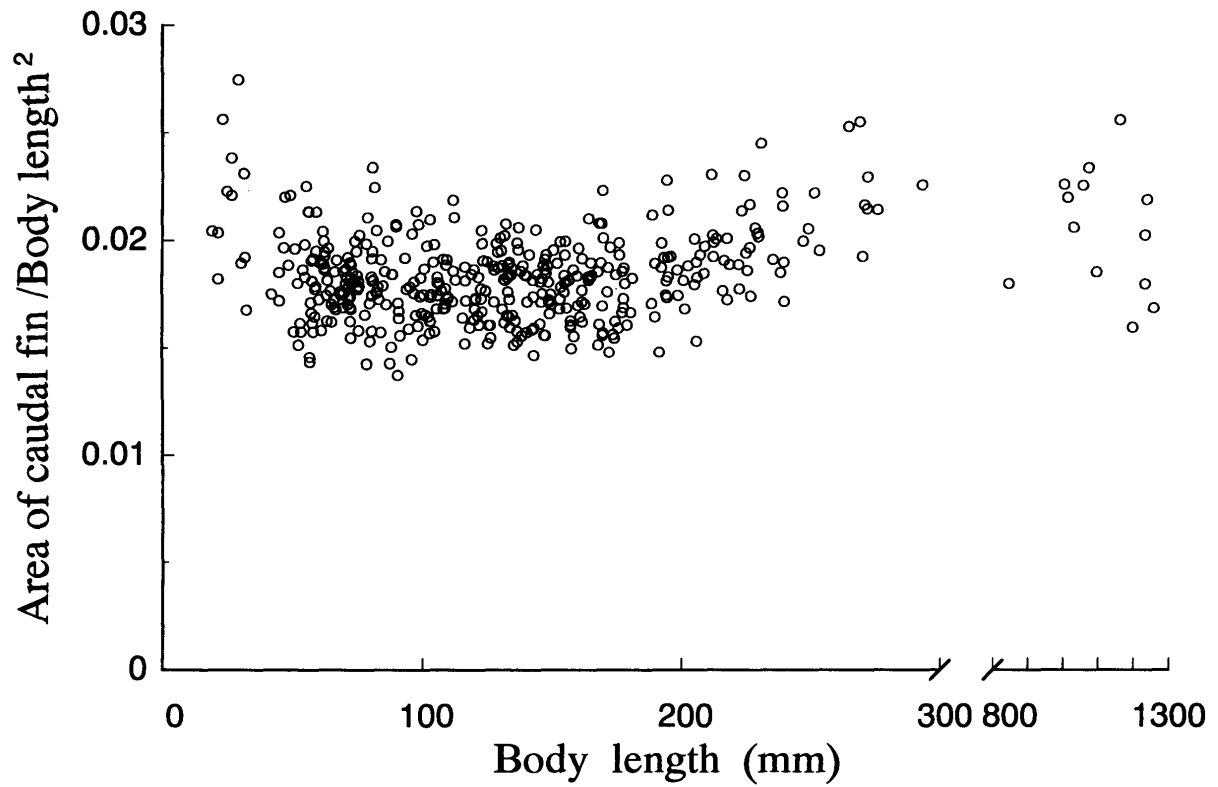


Fig. IV-5. Ontogenetic change of caudal fin area of the Pacific bluefin tuna. Individual larger than 800 mm BL were wild-caught and raised.

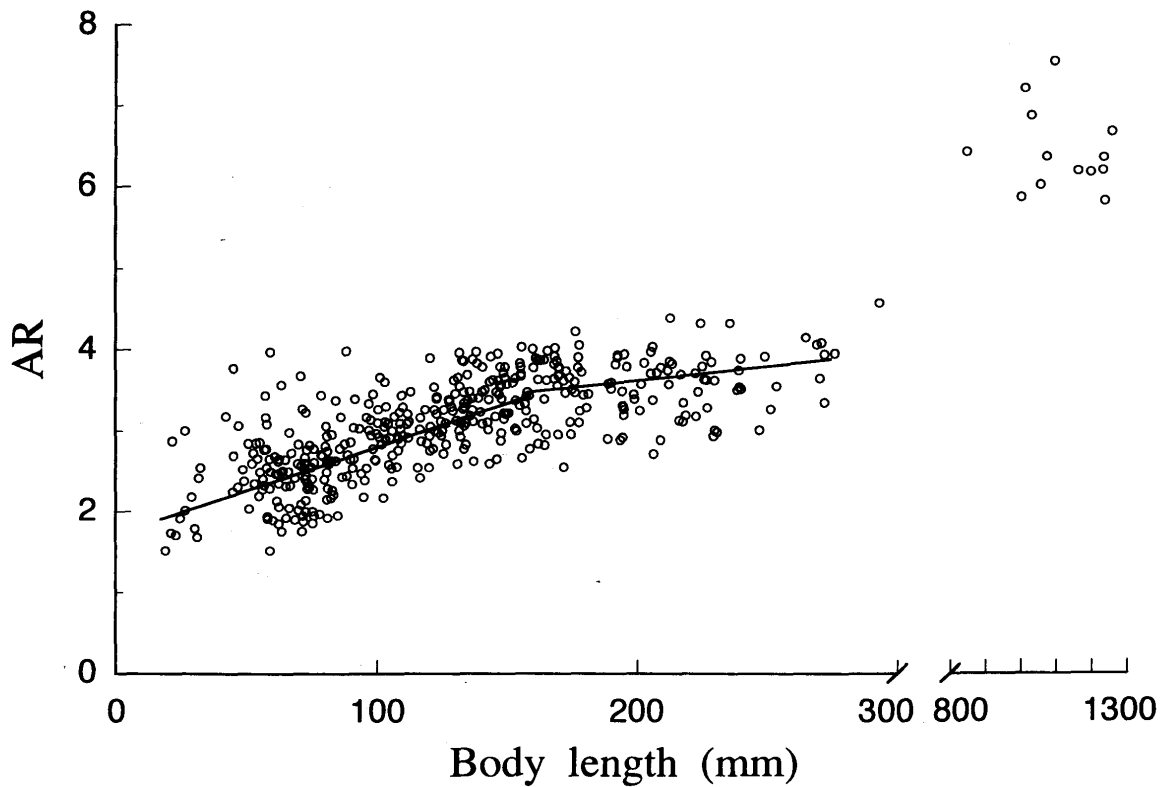


Fig. IV-6. Ontogenetic change of aspect ratio (AR) of the Pacific bluefin tuna. Individual larger than 800 mm BL were wild-caught and raised. Regression lines are also shown.

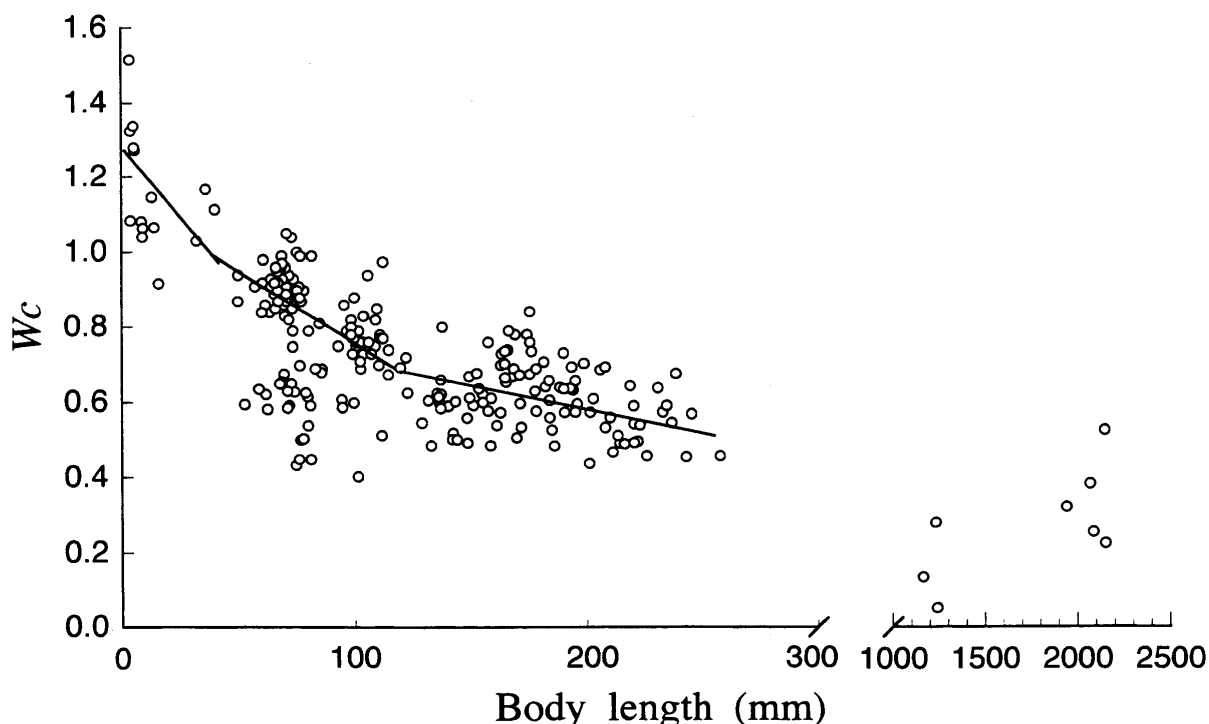


Fig. IV-7. Ontogenetic change of caudal fin shape index (W_c) of the Pacific bluefin tuna, *T. thynnus orientalis*. Individual larger than 1,000 mm BL were wild-caught and raised. Regression lines are also shown.

BL での水準にあった。

一方、20 mm BL で 2 前後であった AR は、発育とともに急激に増加し、150 mm BL 前後で 3.5 前後に達した。その後の AR は緩やかな増加へと移行した。なお、300 mm BL の個体と未成魚の AR を比較すると、前者のアスペクト比は 4 程度であるのに対し、後者では 7 前後と高い値を示した。150 mm BL 以下と以上で最小二乗法による回帰式を求め、得られた 2 つの直線について回帰係数の差の検定⁷⁾により有意差を検討したところ、危険率 5% 以内で有意な差が認められた。

次に、発育に伴う W_c の変化を Fig. IV-7 に示した。 W_c は 11 から 30 mm BL に成長するまでに、1.3 から 1.0 へと急激に減少し、30 から 100 mm BL へ成長する間は、1.0 から 0.7 へと緩やかに減少した。100 mm BL 以降の W_c は、270 mm BL の 0.5 までさらに緩やかに減少した後、未成魚・成魚の 0.3 まで徐々に減少していくものと推察された。

一方、この間には遊泳行動にも変化が観察された。40 mm BL 前後を過ぎると次第に群の形成が観察されるとともに、日中と夜間の群行動に変化が認められた。すなわち、日中の個体間距離は大きく、水槽の表層～中層に広がって群泳していたが、夜間は数 cm 以内の個体間距離で、低流速の水槽中央表層に密集し、ゆっくりとした蛇行群泳を行っていた。その後、孵化後 40～45 日目頃 (80～100 mm BL) を境に、日中の遊泳層が次第に表層から底層までの全域に広がるとともに、夜間の群も密集状態から次第に個体間距離を広げ、中層へ、さらに底層へと拡大し、遊泳速度を除けば昼夜の差は次第に小さくなった。なお、夜間のクロマグロは、稚魚期から若魚期を通じて、常夜灯の下へ接近することではなく、常にこれを避ける群行動が観察された。

発育に伴う巡航速度の日周変化を Fig. IV-8 に示した。50～80 mm BL では日中に比べて日没

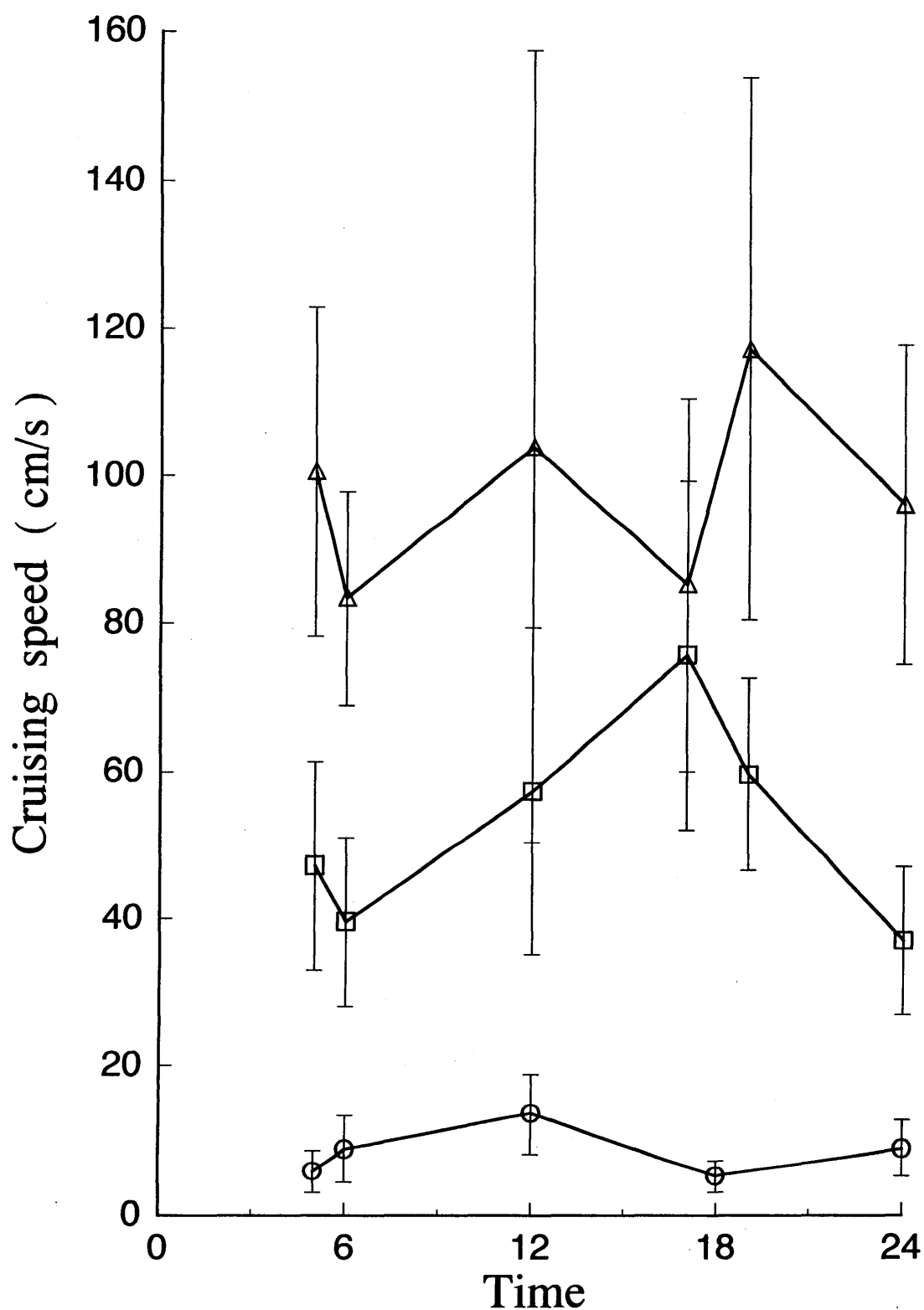


Fig. IV-8. Daily rhythm of cruising speed of the Pacific bluefin tuna with development. ○, 50-80 mm BL; □, 100-120 mm BL; △, 300 mm BL.

以後夜間の巡航速度が約 1/2 となった。100～120 mm BL でも、この日周変動の傾向はほぼ同様であったが、正午より日没時の速度が早い傾向にあった。なお、100～120 mm BL の巡航速度は、

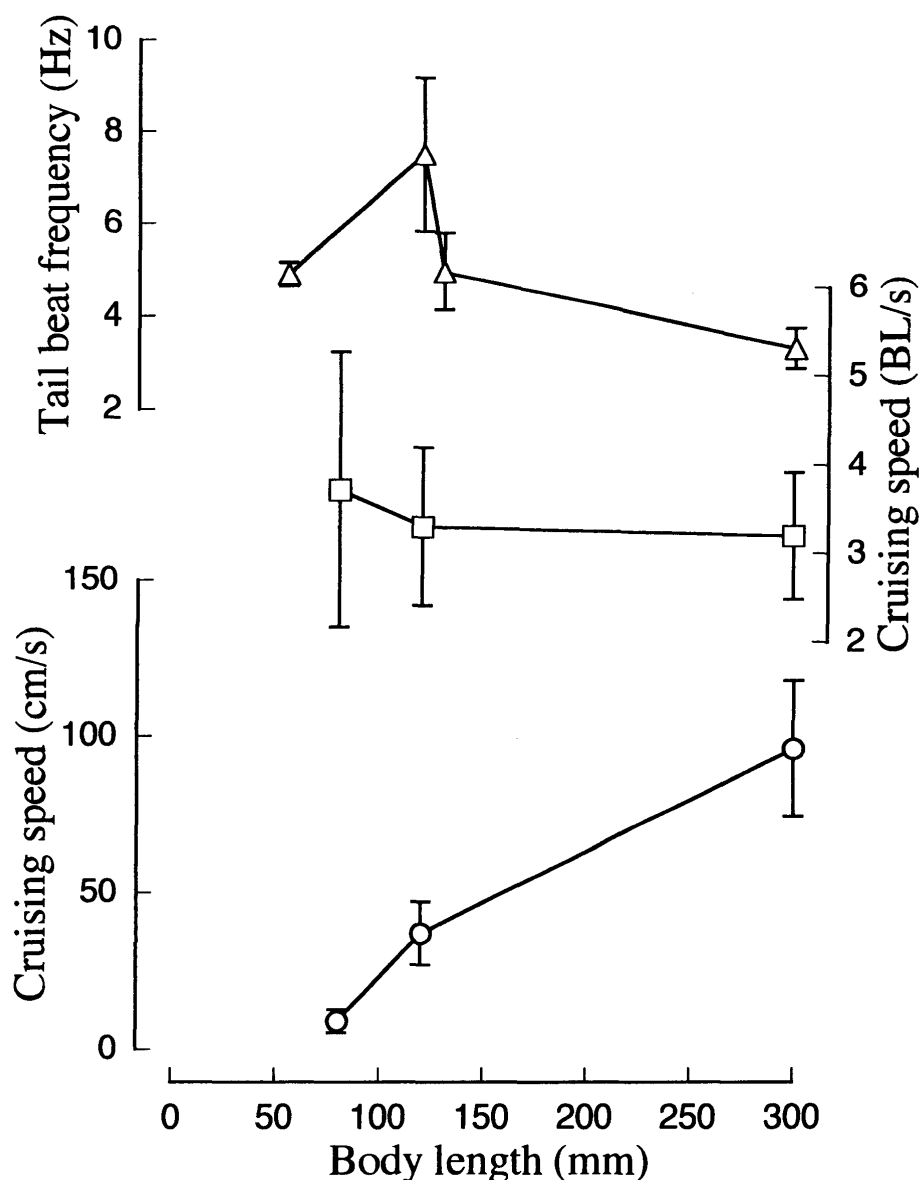


Fig. IV-9. Ontogenetic changes of cruising speed and tail beat frequency of the Pacific bluefin tuna.

50～80 mm BL に比べて正午および夜間ともそれぞれ約 4 倍に達した。300 mm BL になると、夜間の巡航速度は 100～120 mm BL 時の約 2 倍になったが、日中の速度はそれほど速くならず、顕著な日周変動がなくなり、個体間のばらつきが大きくなった。

発育に伴う深夜における巡航速度 (W_{ca} , W_{cb}) と尾鰭振動数 (ν) の変動を Fig. IV-9 に示した。 W_{ca} は BL が 80 mm から 300 mm (30～120 日齢) へ増加するにつれて、 8.9 ± 3.7 cm/s から 85.9 ± 21.6 cm/s へと著しく増大した。しかし、 W_{cb} は平均 BL が 80 から 120 mm (30～45 日齢) へ増加するにつれて、 3.7 ± 1.6 BL/s から 3.3 ± 0.9 BL/s へと緩やかな減少を示した後、BL300 mm (120 日齢) まで変化しなかった。

巡航遊泳時における尾鰭振動数 ν は、平均 BL が 50 mm から 120 mm へと増加するにつれて 4.9 ± 0.3 Hz から 7.5 ± 1.7 Hz へと顕著に増加した。その後、BL135 mm で 5.0 ± 0.8 Hz へと減少し、

平均 BL 300 mm ではさらに減少して 3.3 ± 0.4 Hz を示した。

次に発育に伴う突進速度 (W_{ba} , W_{bb}) の変動を Fig. IV-10 に示した。 W_{ba} は BL が 50 mm から 300 mm へと増加するにつれ 166.0 ± 40.5 cm/s から 496.8 ± 157.4 cm/s へと顕著に増大した。一方, W_{bb} では, BL 50 mm から 120 mm へと増加するにつれ, 34.1 ± 8.8 BL/s から 24.2 ± 8.9 BL/s へと著しく減少した後, 300 mm での 19.1 ± 6.1 BL/s まで緩やかに減少した。

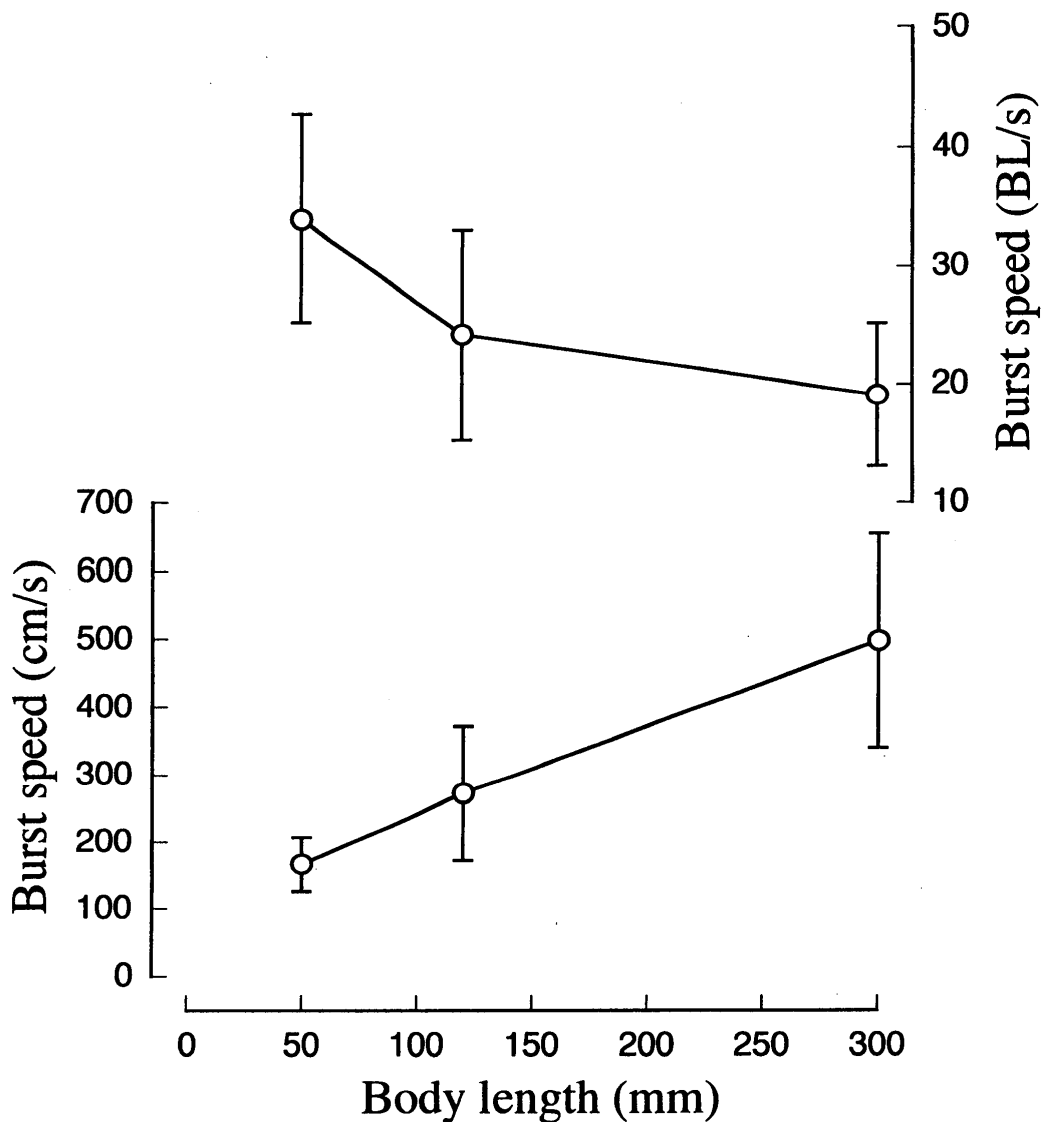


Fig. IV-10. Ontogenetic changes of burst speed of the Pacific bluefin tuna.

(2) 遊泳制御能力に関する外部器官の形態変化

胸鰭, 腹鰭, 第1背鰭および臀鰭について, 発育に伴うそれぞれの基底長, 鰭長および鰭面積の BL に対する割合の変動を Fig. IV-11 に示した。

胸鰭: 発育に伴う胸鰭の形状変化を Fig. IV-12 に示した。60 mm BL (稚魚期) では, 胸鰭全体が透明で丸みを呈していた。稚魚期から若魚期への移行期に相当すると考えられる 80~100 mm BL では, 胸鰭が徐々に長細くなり, 鰭先端部分から徐々に褐色に変化し始めた。すなわち,

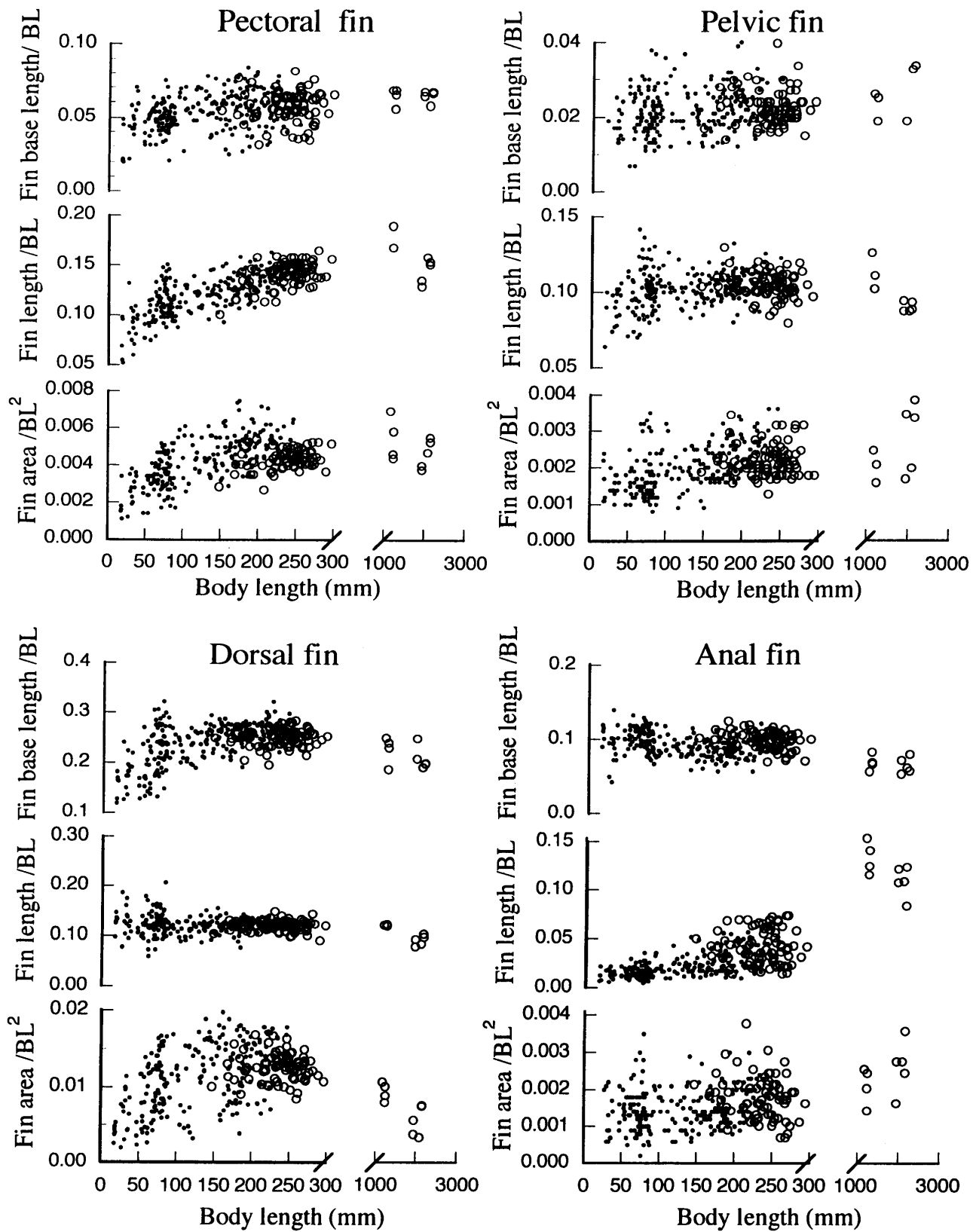


Fig. IV-11. Morphological change of pectoral fin, pelvic fin, dorsal fin, and anal fin with the growth of the Pacific bluefin tuna. ●, artificially hatched fish; ○, wild-caught fish.

胸鰭基底長の増加割合に対して、胸鰭長の増加割合がより大きかったことを示すものである。これらを BL に対する割合の変化でみると、胸鰭長の割合は 20 mm BL の約 7% から 80 mm BL の約 10% まで急速に増加し、80~120 mm BL で停滞した後、再び急速な増加に転じ 200 mm BL で未成魚・成魚の平均値である 14% 前後に達した。この間、基底長の割合は 100 mm BL まで緩やかな増加傾向にあり、その後一定になったことから、鰭面積の割合も増加を続けた後 200 mm BL 付近で、ほぼ未成魚・成魚の平均値に達した (Fig. IV-11)。

腹鰭：発育に伴う BL に対する基底長、腹鰭長およびの鰭面積の割合の変動は、いずれも胸鰭と同様のパターンを示し、200 mm BL 付近で、ほぼ未成魚・成魚の平均値に達した (Fig. IV-11)。

第1背鰭：BL に対する背鰭長の割合は、20~225.6 mm BL まで 12% 前後で変動せず、未成魚・成魚とほぼ同程度を示した。これに対して、BL に対する背鰭基底長の割合は、17.3 mm BL の 12% から 80 mm BL の約 20% まで急速に増加した後、250 mm BL まで一定となる傾向を示した。なお、その後は緩やかに低下する傾向が認められた。その結果、鰭面積の割合は、未成魚・成魚と同水準であった 30 mm BL 前後から 80 mm BL まで急激に増加した後一定となり、250 mm BL 以後は低下する傾向が推察された (Fig. IV-11)。

臀鰭：BL に対する臀鰭基底長の割合は 250 mm BL まで変動せず、その後、未成魚・成魚まで緩やかな減少傾向が推察された。これに対して、臀鰭長は 100 mm BL まで変動しなかったが、以後 250 mm BL まで増加傾向を示した。しかしその割合は未成魚・成魚の 1/2 以下の水準で、その後もさらに増加する傾向が認められた。その結果、鰭面積の割合は未成魚・成魚の水準まで緩やかな増加傾向が推察された (Fig. IV-11)。

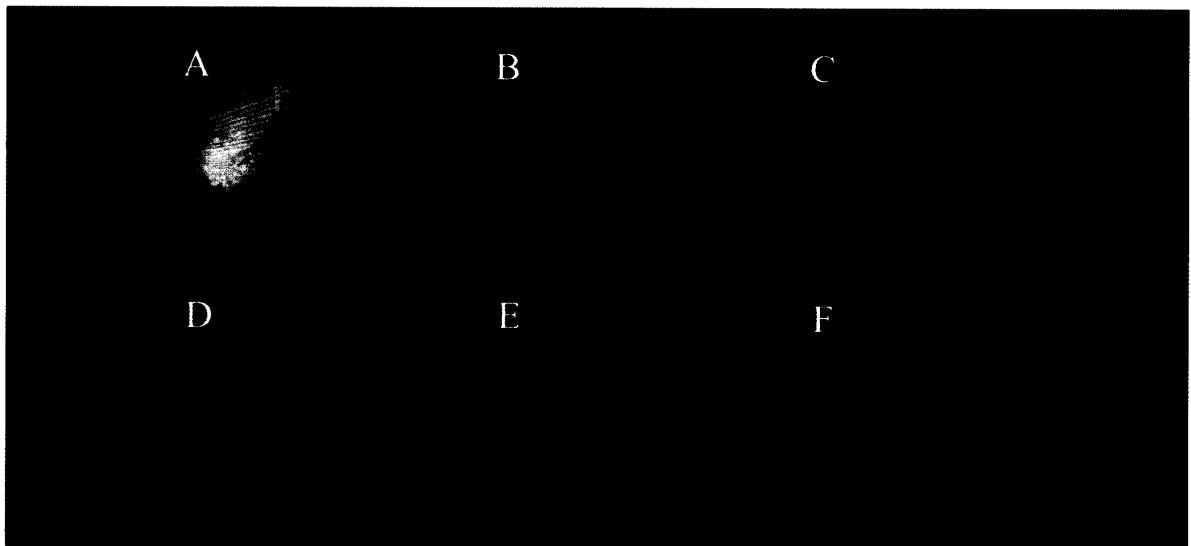


Fig. IV-12. Ontogenetic change of the pectoral fin shape of the Pacific bluefin tuna. A, 55 mm BL ; B, 100 mm BL ; C, 143 mm BL ; D, 195 mm BL ; E, 250 mm BL ; F, 300 mm BL. Scale bar indicate 1 mm for A, and 10 mm for B-F.

尾柄主隆起縁：尾柄主隆起縁の出現は、70 mm BL 前後から確認できる個体もあったが、多くの個体で明瞭に確認できた魚体の大きさは 80~100 mm BL であった。発育に伴う尾柄主隆起縁面積の体長に対する割合の変化を Fig. IV-13 に示した。尾柄主隆起縁面積の割合は、その出現から体長 160 mm までに急激な増加を示した。その後、200 mm BL までやや緩やかに増加した後、未成魚のそれと同レベルとなった。

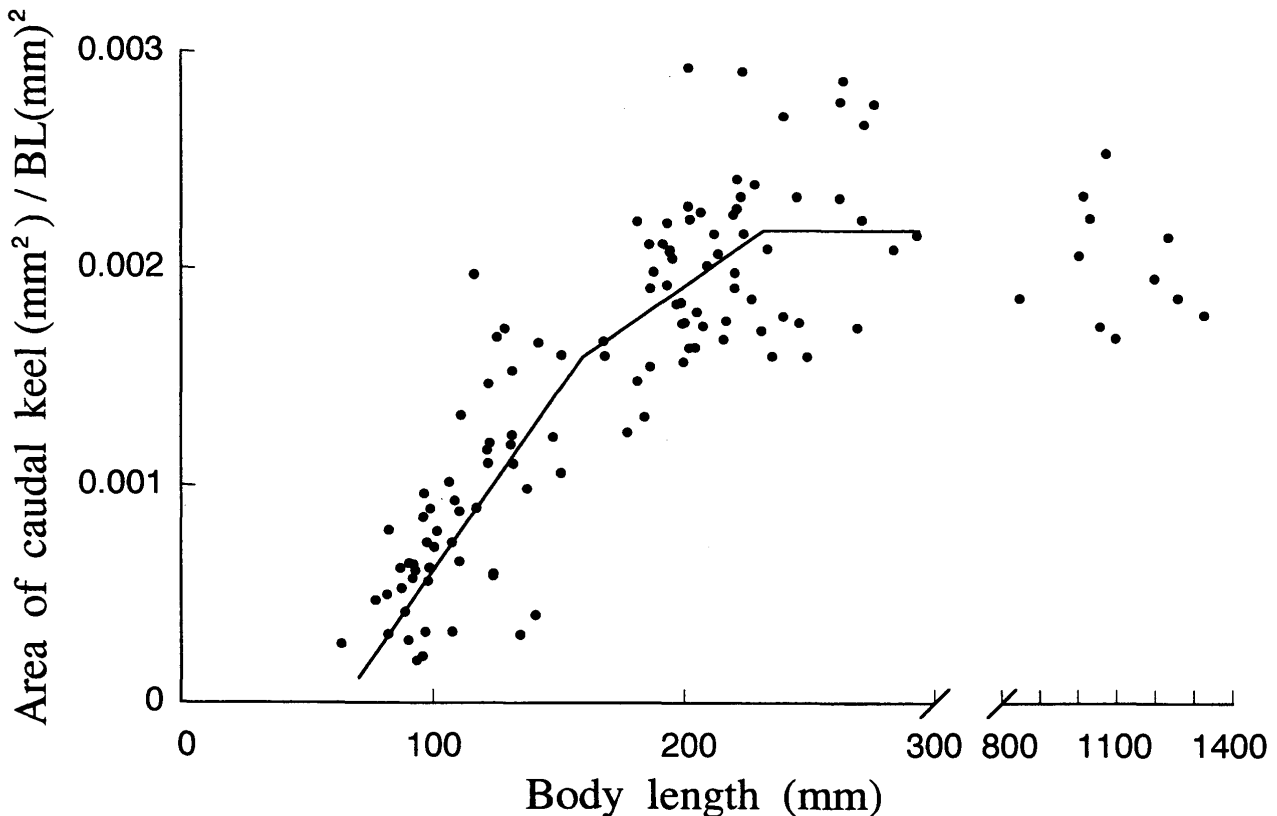


Fig. IV-13. Ontogenetic change of caudal keel area in the Pacific bluefin tuna. Individual larger than 800 mm BL were wild-caught and raised. Regression lines are also shown.

IV-1-3. 考察

(1) 遊泳推進力に関する外部器官の形態変化

魚類における主な推進器官である尾鰭の能力は、その面積ではなく、形状によるといわれている^{249, 250, 255)}。ARの高い縦長の尾鰭は、同じ面積をもつ低ARの尾鰭と比較して、魚体の後方に生じる渦流域の外で振動することができる尾鰭の部分が大きくなる²¹⁷⁾。

また、翼（尾鰭）が前進する場合、翼（尾鰭）によって影響を受ける流体の質量は、翼幅（尾鰭幅）の2乗と速度との積に比例するため、ARの高い尾鰭は低い尾鰭に比べ推進力が大きくなり²⁵⁶⁾、持続的に遊泳する場合に遊泳効率が高くなる^{249, 255)}。また、クロマグロは呼吸を遊泳による鰓換水に依存しているため²⁵⁷⁾、常に泳ぎ続ける必要がある。これらのことから、クロマグロは泳ぎ続ける場合にのみ効率の良い遊泳と呼吸を可能にしている機構を持っていると考えられる。尾鰭のARが高くなるということは、生きるために必要とする酸素を安いコストで入手することが可能になることを意味する。人工孵化クロマグロの尾鰭のARは、発育に伴って160 mm BLまで急激に増加する。このことは、クロマグロにとって持続的な遊泳を行う場合に遊泳効率が高くなることを意味し、マグロ類の特徴である高速巡航遊泳が可能な体型へと変化するものと考えられる。

しかし、300 mm BL前後に成長しても、尾鰭のARは1,000～1,200 mm BLの個体に比べて1/2程度であり、以後もクロマグロは高い遊泳効率を得るために体型を変化させ続けることが明らかとなった。

一方、団扇型の尾鰭は、一般的に仔魚期の魚類、および停止状態から一気に急加速して餌に襲いかかる待ち伏せ型の捕食を行う魚種によく見られ²⁵¹⁾、高い W_c を示す。このような鰭形状は、巡航的な遊泳における遊泳効率は低いものの、進行速度が 0 あるいは十分に小さいときに尾鰭を急激に煽ると、尾鰭の周りの流れは剥離して非定常の渦が発生し、非線形渦揚力が大きい推進力をつくる²⁵⁶⁾ ことから、突進的な遊泳力が高いといえる。

クロマグロにおける W_c は、40~50 mm BL まで急激に減少する。40~50 mm BL は、単発的に尾鰭を激しく動かす突進的遊泳から、持続的に尾鰭を動かす巡航遊泳への移行時期とほぼ一致し、50 mm BL に達すると巡航的な遊泳を主として行うようになる。その後の W_c の変動は、50~100 mm BL では緩やかに減少し、100~300 mm BL ではほとんど変化しなかった。

50 mm BL 以降の人工孵化クロマグロは、活発にイカナゴなどの魚肉を摂餌するようになる。天然外洋海域では、より大型の魚類を捕食するために広い範囲を探索しなければならず、かなりの遊泳力を必要とすることが推察される。従って、同時期以降の尾鰭は、より一層効率的な巡航遊泳を行うための形態へと変化し続けるのであろう。

このような高速巡航遊泳に適する形態への変化は、遊泳速度の変動からも窺うことができる。120 から 300 mm BL における巡航速度 W_a は、 8.9 ± 10.1 cm/s から発育に伴って 95.9 ± 21.6 cm/s にまで著しく速くなるが、尾鰭振動数は逆に 7.5 ± 1.7 Hz から 3.3 ± 0.4 Hz へと半減し (Fig.IV-9)、遊泳効率が著しく向上していることを示している。

以上のように、クロマグロの推進力として重要な尾鰭の形態は、300 mm BL 以後も発達し続けるが、AR は 120 mm BL までに急速に高まり、 W_c は 100 mm BL 前後までに急速に低下して未成魚の水準に達することなどから、100~120 mm BL までに急速に高速巡航遊泳に適した形態を獲得するものと考えられる。

また、突進速度を計測したところ、 W_b は 50 mm BL から 300 mm BL に成長するに伴って 3 倍に増加したが、 W_b は逆に減少した。2~5 秒間測定する W_b については、ブラウントラウト、*Salmo trutta*²⁵⁸⁾ で、100 mm TL から 400 mm TL に成長すると、17.5 BL/s から 1.5 BL/s に、大西洋ニシン、*Clupea harengus*²⁵⁸⁾ で 10 mm TL から 200 mm TL に成長すると、10.1 BL/s から 5.6 BL/s に、ベニザケ、*Oncorhynchus nerka nerka*²⁵⁹⁾ で 100 mm TL から 900 mm TL に成長すると、4.5 BL/s から 2.0 BL/s に、それぞれ減少することが知られており、 W_b の成長に伴う減少は、魚類一般にみられる現象である²¹⁷⁾。なお、多くの魚で W_b は 10 BL/s 前後で、サケ科やサバ科の魚でこれを超える値を示す²¹⁷⁾ といわれている。本実験で得られたクロマグロの、50 mm BL で 34.1 ± 8.8 BL/s、300 mm BL で 19.1 ± 6.1 BL/s という値はかなり高いものといえる。 W_b は、他魚種における多くの実験で抗流容器を用いて計測しているが、クロマグロの場合にはそれが困難であるため、驚愕反応時の速度を計測した。従って、これを考慮する必要があるものの、クロマグロの遊泳能力は他魚種に比べて顕著に高いものと推察される。

(2) 遊泳制御能力に関する外部器官の形態変化

鰭の発達過程は魚の発育に伴う生活様式を知る上で極めて重要であり、マダイ²⁶⁰⁾、クロダイ²⁶¹⁾、イシダイ²⁶²⁾、ブリ¹⁶⁶⁾、シマアジ²⁶³⁾、イサキ、*Parapristipoma trilineatum*¹⁷⁰⁾ など多くの研究がある。しかし、これらは初期発育における鰭条の分節、分岐の変化を主とした形態学的研究であり、遊泳能力との関連を調べた研究はみあたらない。さらに、稚魚期以降の鰭の発達に関す

る研究は皆無である。

遊泳能力に関する鰭の効率は、質的要素と形態的要素の複合結果と考えられるが、前者の効率は、軟条の柔軟性と弾性との複合によるといわれ²⁶⁴⁾、後者では、面積と形状との複合によると考えられる。本研究の遊泳能力の指標としては、前者の発達後者のそれに伴うものとみなし、制御能力に関しても、主として形態的要素について調べた。

魚体の横揺れ防止や急旋回時に安定を保つために重要な背鰭および臀鰭は、クロマグロの発育とともにその形状は変化し、100～200 mm BL でほぼ一定となった。これに対して、方向転換の際にブレーキや舵の役目をし、揚力獲得の働きがある胸鰭は、100～150 mm BL の範囲で急速に発達し、体長に対する基底長比はほぼ一定となるが、長さおよび面積の比はその後さらに増加を続け、約 200 mm BL で未成魚・成魚の水準に達することが分かった。目視観察からも 160 mm BL 前後から胸鰭を広げた遊泳方法を行うこと、胸鰭の色が透明から黒色へと変化し硬質化することが観察された。これらのことから、胸鰭は 150～160 mm BL 前後から目立って遊泳に関与し始め、以後、200 mm BL に達するまでに制御能力の獲得がさらに進むことが示唆される。また、主としてブレーキの機能を有すると思われる腹鰭の発育も、ほぼ胸鰭と同様なパターンを示した。

マグロ類の胸鰭はサメ類と異なり、後退角を変えることができる²¹⁷⁾。水槽中の人工孵化クロマグロにおいても、その後退角を変える行動が観察されており、主として狂奔遊泳からの回復や、方向転換などの姿勢制御を行うときに観察される。成魚におけるマグロ類の揚力は、中低速で遊泳している場合、胸鰭 80% に対して尾柄主隆起縁 20%、突進遊泳時は胸鰭を体側に格納するので魚体自身 70% に対して尾柄主隆起縁 30% の割合とされる²¹⁷⁾。人工孵化クロマグロにおいて 160 mm BL までは胸鰭がそれほど機能化しておらず、遊泳行動からみても、揚力の獲得は主として魚体自身および尾柄主隆起縁によるものとみなされる。従って、160 mm BL までの人工孵化クロマグロの遊泳方法は、揚力獲得という視点からみれば、胸鰭をたたんで行う成魚における突進遊泳と同様の状態であると考えられる。なお、尾柄主隆起縁は揚力獲得だけでなく、尾柄部分の水抵抗を軽減させ、同部位の強化をも担っている²¹⁷⁾ ことから、推進力とも関連が深い。体長に対する尾柄主隆起縁面積の割合は、75～160 mm BL において急激に増加する。この発育ステージでアスペクト比にも屈折点が見られることなどから、巡航遊泳に有利となる形質は体長 160 mm を目処に急激に変化することが示唆される。

以上の結果を総括すると、100～160 mm BL を中心にしたクロマグロでは、魚体自身によって安定的な揚力と制御力を獲得するのは困難と考えられる。すなわち、100～160 mm BL では、遊泳推進力は顕著に増加するが、揚力や制御能力獲得のための胸鰭、腹鰭および尾柄主隆起縁などの器官の発達が十分ではないことから、魚体重を支えるためにより速く泳がねばならず、コストの高い遊泳を余儀なくされている発育段階であり、遊泳能力が最も不安定な時期であると推察される。このような発育過程も、大洋で生活する天然のクロマグロにとっては問題のないことと推察できるが、水槽や網生簀中で飼育される魚は頻繁に方向転換を強いられることになり、遊泳運動に対する負担は重いはずである。ましてや、驚愕反応を誘発した場合には、生簀の広さが狭いほど、突進遊泳持続距離、もしくは障害物回避体勢を整え得るまでの距離内に生簀網が存在することになり、これに衝突する頻度が高くなるということは想像するに難くない。

IV-2. 衝突による骨格損傷とその多発期²⁰⁹⁾

本実験では、クロマグロの遊泳行動の観察と死亡魚の骨格損傷状態から、主な致死原因が水槽壁への衝突であることを検証し、その多発発生ステージを明らかにするとともに、第Ⅲ章から前節までに調べた結果から、稚魚から若魚期における衝突死多発の原因を検討する。

IV-2-1. 材料および方法

供試魚および飼育水槽（直径約 7m）は前節の実験で用いたものと同じである。孵化後 30～120 日目までの毎日、遊泳行動を観察するとともに、死亡魚を確認次第速やかに採り上げて計数および体長（BL）の測定を行った。後に、これらを 10%ホルマリン液で固定し、その中から、BL 30, 50, 70, 85, 100, 130, 160 および 225 mm にそれぞれ近い個体 10 標本を任意に抽出し、軟 X 線写真を撮影して骨格の損傷状態を観察した。なお、死亡率は 2 水槽の合計で表した。

IV-2-2. 結果

屋内水槽における孵化後 30 日目から 120 日目までの成長は Fig. IV-1 の通りであり、日間死亡率と生存個体数の推移を Fig. IV-14 に示した。

1,200 尾を収容した孵化後 30 日以降の生存個体数は、孵化後 45 日目に約 600 尾、孵化後 60 日目に約 200 尾と急激に減少した。日間死亡率をみると、孵化後 33 日目には 4.9%であったが、孵化後 52 日目の 8.9%へと増加した。それ以後、5～7.2%の間で変動し、平均約 4%であった。孵化後 90 日目以後の日間死亡率の大きな変動は、生存個体数が少ないことによる。目視観察中に水槽壁に衝突して死亡した最小個体は全長 24 mm であった。これらの衝突は、孵化後 30 日以降次第に頻度を増し、シートに衝突するのが目撃された。衝突の衝撃はかなり大きいと考えられ、それは成長に伴って激しさを増し、衝突時の衝撃音も次第に大きくなった。

体長 200 mm（体重約 100 g）以上に成長すると、ときにはシートを突き破る個体も観察された (Fig. IV-15a)。実験終了時にシート水槽を点検したところ、側面のいたるところに大小多数の破れ穴が認められ、魚の衝突によるものと推察された (Fig. IV-15b)。そこで、Fig. IV-16 に示すように、シート水槽側面周囲を 8 方位に分割し、方位別の破れ穴数を計数した。破れ穴は全方位に認められたが、東の方角に最も多かった。

死亡標本による観察の結果、衝突によると思われる骨格損傷は 2 つのタイプに分類できることがわかった。すなわち、脊柱の脱臼と副蝶形骨の骨折であり、個体によっては、これらが両方とも認められた (Fig. IV-17)。脱臼は多くの場合、第 1 脊椎から第 10 脊椎の間で観察された。なお、これらの骨格損傷は 30 mm BL より小さい個体では観察されなかった。死亡魚中におけるこれら損傷の発生率は、50 mm BL で 30%であったが、85 mm BL で約 80%に増加し、それ以降では少なくとも 60%以上を示した (Fig. IV-18)。

脊椎脱臼の発生率は 30 mm BL から増加し、85 mm BL において 40%の最大値に達し、その後減少した。副蝶形骨骨折の発生率も同様に 30 mm BL から増加し、100 mm BL において 50%の最大値に達し、130 mm BL で 10%に減少した後、再び増加した。脊椎および副蝶形骨の両方に損傷の見られる個体の率も 30 mm BL から増加し、130 mm BL より大きな個体では 30%以上

であった。

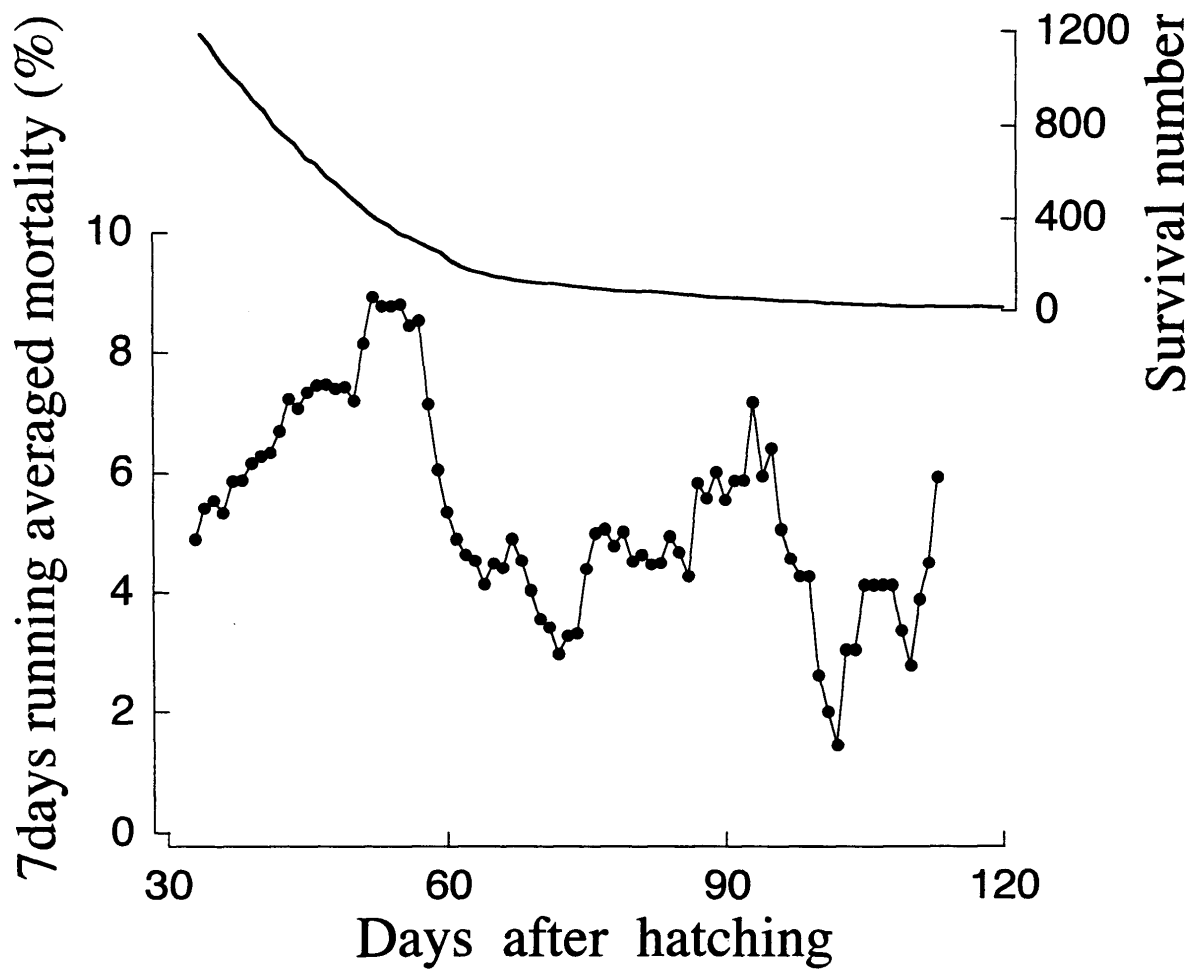


Fig. IV-14. Survival number and daily mortality of the Pacific bluefin tuna during the indoor culture experiment.

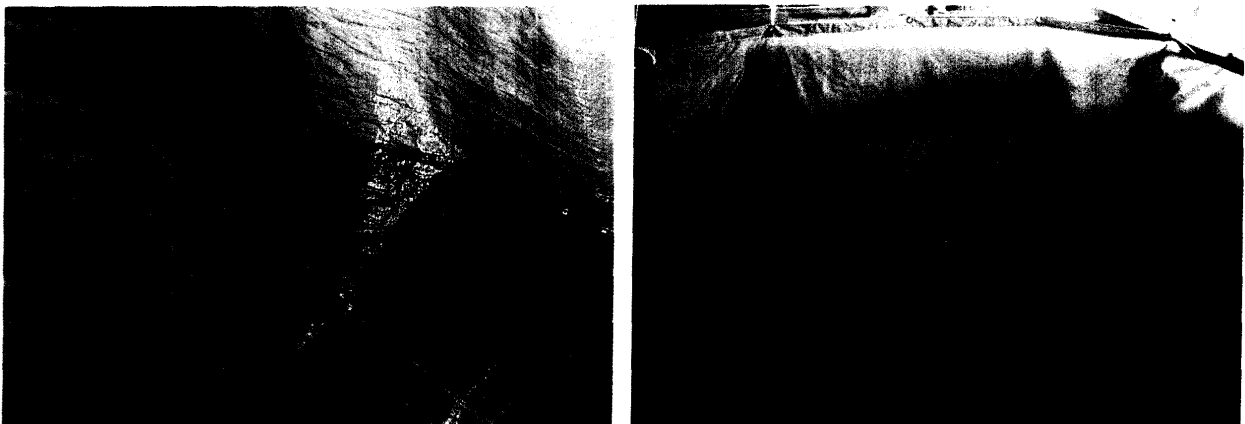


Fig. IV-15. Breaking holes in the sheet tank side which seems to be caused by collisions of the Pacific bluefin tuna (right). Young bluefin tuna broke through the shock absorbing polyvinyl sheet put around the tank wall (left).

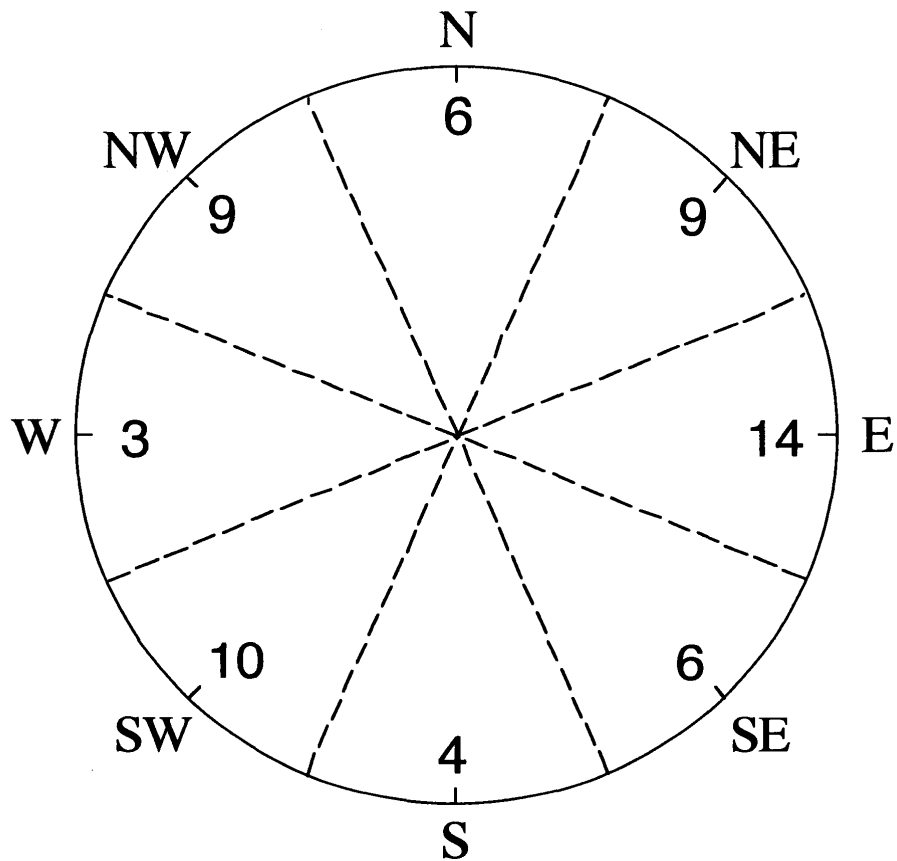


Fig. IV-16. The number of breaking holes in the azimuth independence sheet tank side which seems to be caused by the collisions of the Pacific bluefin tuna is shown.

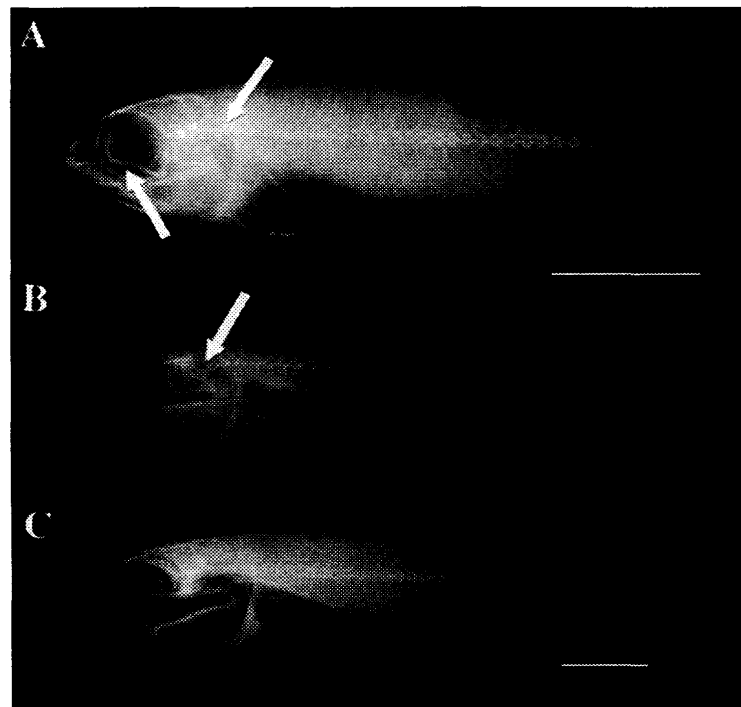


Fig. IV-17 X-ray photographs of representative bone injuries in the dead specimens of the Pacific bluefin tuna. (A) Specimen with both the dislocation of vertebral column (right arrow) and the fracture of parashenoid (left arrow). (B) Specimen with the dislocation of vertebral column (arrow). (C) Specimen without bone injury. The upper scale bar indicates 20 mm for A. The lower scale bar indicates 20 mm for B and C.

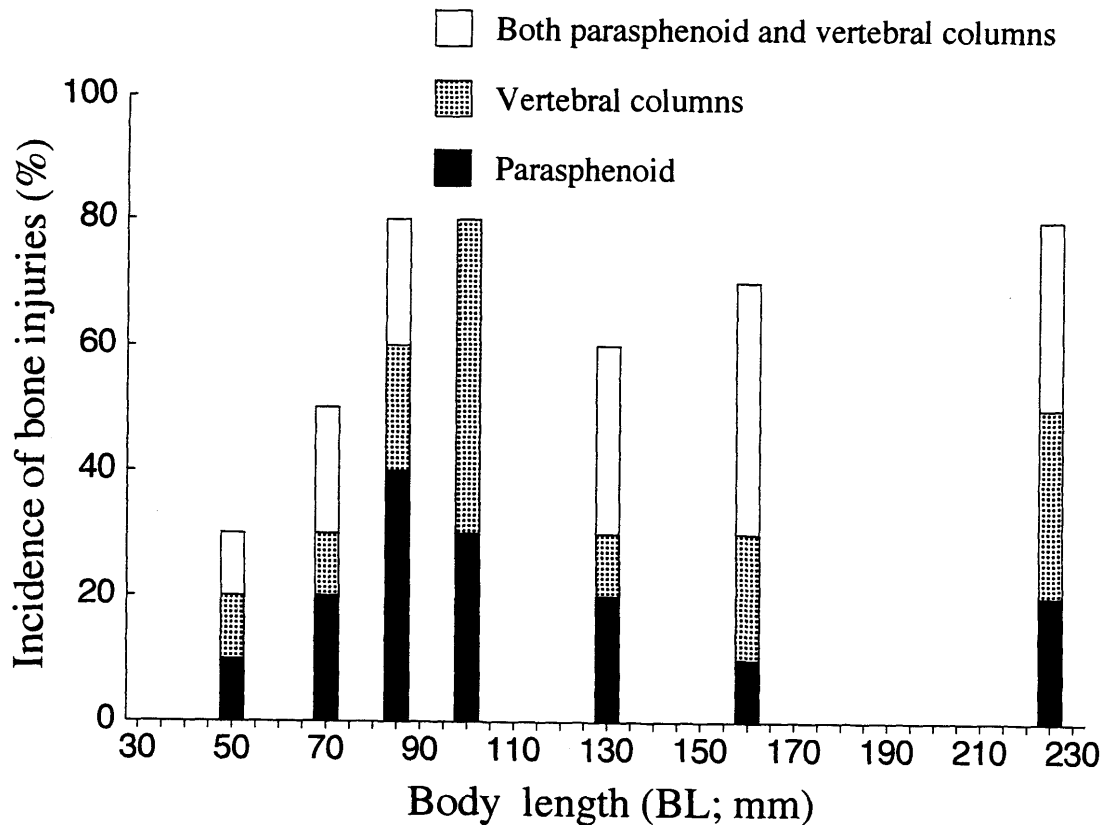


Fig. IV-18. Incidence of bone injuries in the dead specimens of the Pacific bluefin tuna during the indoor culture experiment.

IV-2-3. 考察

衝突による骨格の損傷には、脊椎の脱臼および副蝶形骨骨折に加えて、衝撃が強いときには、神経頭蓋の骨折が観察された。なお、これら骨格損傷の他には致死原因となる損傷は観察されなかった。加えて、細菌性あるいはウィルス性疾患や致命的な寄生虫疾患、例えばミナミマグロでの *Scuticociliates* による疾患²⁶⁵⁾ や有毒な微小藻類²⁶⁶⁾ も認められなかった。

損傷の認められた副蝶形骨と脊椎はどちらも体軸方向を向いている。すなわち、魚が障害物に対し頭部から衝突する場合には、これらの骨に損傷をうけ易いものと考えられる。従って、中間育成初期の減耗の主な要因は、水槽壁および生簀網への衝突によって起こる脊椎の脱臼および副蝶形骨骨折であるとみなされた。

クロマグロは第Ⅲ章で述べたように、約 10 mm BL で仔魚から稚魚期へ、80~100 mm BL で稚魚から若魚期へ移行する。本研究での衝突による減耗は、魚が 50 mm BL のサイズに達したときに増加し、80~160 mm BL のサイズで最高となった。従って、衝突による死亡率は、稚魚期のステージから若魚期初期にかけて増加したことになる。

これらのステージの間には、遊泳能力に関するクロマグロの形態的特徴が著しく発育した。例えば、第Ⅲ章で示したように、筋繊維の断面積や数量が著しく増加するとともに、前節で示したように尾鰭の形状変化が顕著であった。また、これらの変化は、巡航中および突進時の遊泳速度の増加をもたらした、かつ、既往の他魚種に比べてその速度が顕著に速いことがわかった。

そこで、このような遊泳推進力に関係の深い尾鰭の発達と、揚力獲得、方向転換および停止な

ど、遊泳制御能力に関係の深い胸鰭および腹鰭の発育割合の変化を Fig. IV-19 に示した。これは、Fig. IV-5 および 11 にそれぞれ示した各鰭の発育のうち、体長に対する面積の割合を、未成魚・成魚のそれを 100 とした指数で表し、近似曲線で比較したものである。また、クロマグロと同科のマサバについても同様に調べて比較した (Fig. IV-19)。マサバも未成魚以降では時に衝突死がみられるが、種苗生産過程ではみられない。尾鰭の面積比は、マサバで若齢期に高い水準を示した他は、両種とも成魚における比率を中心に推移した。ところが、胸鰭および腹鰭の発育過程は両種で全く異なっていた。マサバの鰭面積の体長に対する割合は、早いステージから未成魚・成魚における比と同水準か、それよりかなり高いのに対して、クロマグロでは、30 mm BL におけるその割合が成魚の 40% 内外と顕著に低かった。80~160 mm BL でも成魚の 60% 内外で、未成魚・成魚の水準に達するのは 300 mm BL 前後である。さらに、クロマグロでは、胸鰭とともに揚力を得るために重要な尾柄主隆起縁は 90 mm BL 前後から発現し、それらの形態が未成魚・成魚の水準に達するのは 200~250 mm BL であった (Fig. IV-13)。

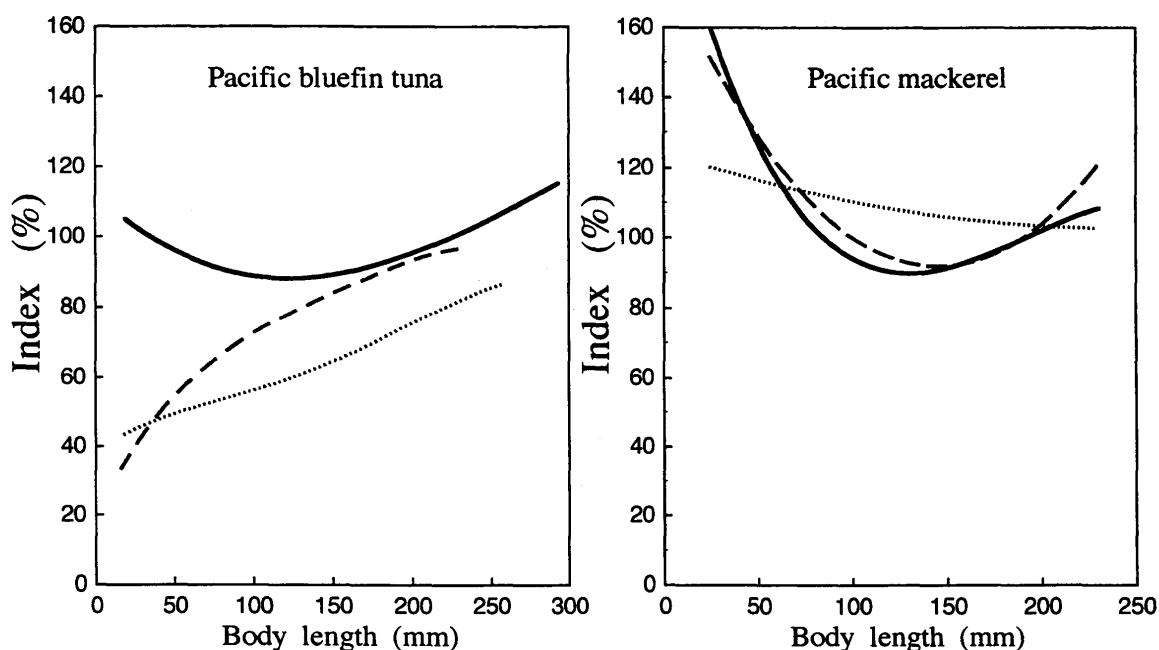


Fig. IV-19. Change of fin area with growth of the Pacific bluefin tuna and the Pacific mackerel. Fin areas are expressed by indices relative to the areas of the adult fish. Indices of the adult fish are 100%.
 — Caudal fin area ; — — — Pectoral fin area ; Pelvic fin area.

また、親魚養成用に串本周辺で曳き縄釣りによって採捕している天然産のヨコワのサイズと、これを網生簀へ活け込んだ後の生残率の推移を Fig. IV-20 および 21 にそれぞれ示した。このように、毎年 8 月を中心に紀伊半島周辺海域に来遊して来るヨコワの体長組成は 200~350 mm で、モードは 250 mm 付近にある。そして、これを網生簀に活け込んだ後の死亡魚には、皮膚にハンドリング時に受けたと思われる損傷がある個体の他に、衝突によるものと思われる脊椎骨の脱臼が多く認められるが、減耗は 10 日以内にほぼ終息し、生残率は 70% 以上である (Fig. IV-21)。なお、このサイズ以下の天然産幼魚を飼育した例や報告はない。

以上の結果から、稚魚後期から未成魚初期 (200~250 mm BL) に至るまでのクロマグロは、揚力獲得を遊泳による推進力と魚体自身に頼っており、制御能力にゆとりがなく、急旋回や急停

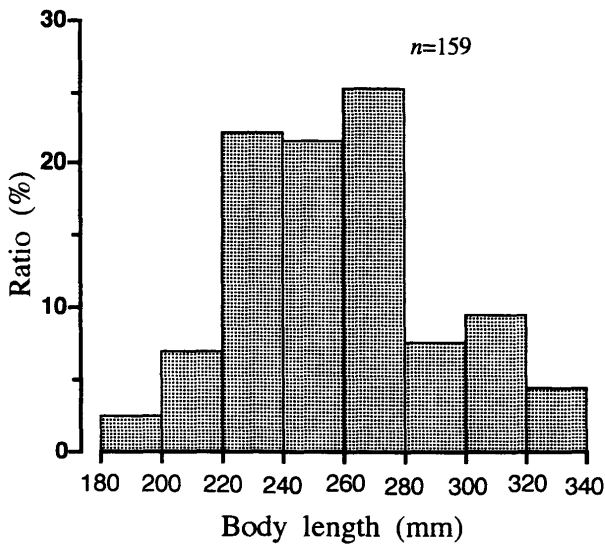


Fig. IV-20. Size composition of the young Pacific bluefin tuna that was captured around Kushimoto (1995-1997).

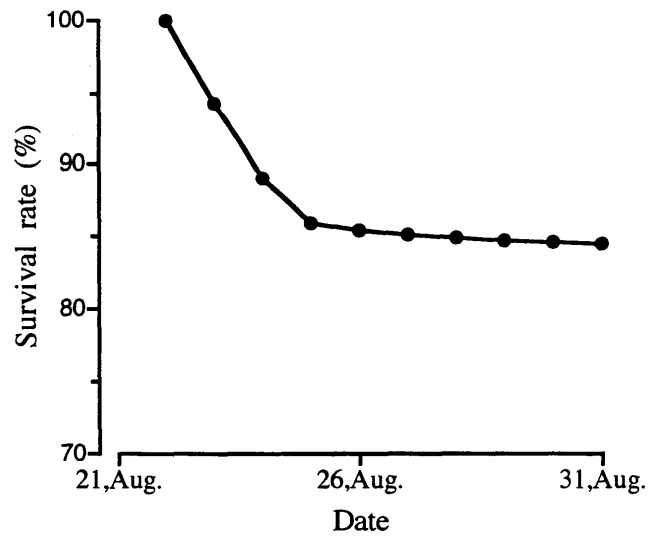


Fig. IV-21. Survival rate of the wild and young Pacific bluefin tuna, after the culture is started in net cage (1997).

止を行う能力が低い発育段階であるといえる。このような状態で突進遊泳を行った場合、自然界におけるクロマグロが障害物に遭遇する確率は極めて低いと推察できるが、水槽あるいは網生簀内においては、突進遊泳の起点から、その持続距離もしくは衝突回避体勢を得る地点までの距離内に水槽壁あるいは生簀網が存在することになる。すなわち、衝突死は、驚愕反応による突進遊泳が誘発された場合、障害物を回避できないうえ、著しく速い遊泳速度からもたらされる衝突時の衝撃度が一般魚類に比べて顕著に大きいため、頭部骨格あるいは椎骨に致命的な損傷を負うことにより生じると考えられる。なお、未成魚への移行時期のサイズを平均的な値で示したが、総ての個体が各鰭の体長に対する比で未成魚と同水準に達するのは 300 mm BL 以後であった (Fig. IV-11)。

このように、クロマグロの稚魚期および若魚期においては、体重の著しい増加とともに強い推進力を獲得するにもかかわらず、遊泳制御能力が未発達であり、これが衝突死を多発させることに大きく関係しているものと推察される。人工孵化クロマグロの衝突死多発現象の原因の一つに、人工飼育による栄養障害に起因する神経過敏症、例えば、ニジマスにみられるビタミン B1 または B6 欠乏症^{267, 268)}などの可能性も考えられ、これをすべて否定するわけにはいかないが、本研究で明らかにしたように、衝突死多発の一要因は、クロマグロの発育過程の一時期に認められる生理生態的特性が大きく関与しているものと考えられる。

これは遊泳行動の観察によっても認められた。人工孵化クロマグロの巡航遊泳は、200～250 mm BL までは胸鰭を畳んだ状態、すなわち、突進遊泳に近い姿勢でひたすら泳ぎ続けるが、それ以上に成長すると次第に胸鰭を出す頻度が高まり、明らかにそれまでと異なった“ゆとり”が感じられた。

以上を総括すると、クロマグロにおける稚魚期から未成魚初期 (300 mm BL 前後) までは、突進遊泳によって生簀網に衝突する確率が高く、飼育が困難な時期である。ゆえに、これを防除するためには、まず網生簀の大きさと構造を良く検討する必要がある。また、活漁船などによる輸送についても、これらを念頭においた技術開発が重要であり、特に 300 mm BL 以下のクロマ

グロについては細心の注意が必要となる。

成魚でも雷鳴と雷光の後に衝突死が認められることがあるが、稚魚期および若魚期のクロマグロは、次のような場合パニックを起こして水槽壁に衝突するのが目撃された。それらは飼育水槽の周囲での光、大きな騒音および飼育水槽壁の震動などである。さらに、夜間の巡航遊泳時における個体間の接近から誘発される場合も認められた。これらの刺激は、他魚種が応答するより弱い水準でも、クロマグロではパニックを引き起こすことが観察された。それゆえ、このような刺激が、水槽あるいは網生簀での養成期間中における突進遊泳誘発要因となり、衝突による減耗を引き起こした可能性が高い。

魚は夜明け前に神経質であり、時にはパニックを起こすことが知られている。前節で述べたように、日の出や日没前後にクロマグロの不安定な遊泳行動が多く認められた。本実験において、衝突によってできたと思われるシート水槽側面の破れ穴の頻度が東側に最も多かったことは (Fig. IV-16)、日の出の陽光が刺激となっている可能性もある。現在、この直接の原因は不明であるが、空腹がその原因の一つであるかもしれない。また、夜間点灯した常夜灯は、魚群を平穏に維持する上で効果的であった。しかし、停電および漏電事故による照明の点滅によって激しいパニック遊泳を誘発し、衝突による減耗が激増することも認めた。衝突防除対策はこれらの点も考慮して総合的に策定する必要がある。

第V章 クロマグロの種苗生産

第Ⅲ、Ⅳ章で述べた基礎研究のための飼育および量産実験の結果、クロマグロの種苗生産過程には、大きな減耗期が3段階にわたって存在することが明らかとなり、その量産は現在のところ難しい。すなわち、孵化後10日目頃までに認められる第1減耗期、孵化後10日目頃(7 mm TL)から認められ、特にflexion期から稚魚前期にかけて激しくなる共喰いによる第2減耗期、および稚魚から若魚期にかけての突進遊泳誘発-衝突による第3減耗期である。

従って、現在までクロマグロの人工種苗を養殖用に用いたという報告例はない。しかしながら本研究では、基礎研究と平行して試みた種苗生産によって、1994年産は1歳(246日)までに全滅したものの、1995年産の人工孵化クロマグロが、9尾と少ないが2000年には初めて満5歳の成熟年齢に達した。また、続く1996年産が19尾、1998年産が400尾、2000年9月現在でそれぞれ生存している。

本章では、種苗量産技術の開発に資するため、先に述べた減耗対策を念頭におきながら、第Ⅰ～Ⅳ章で述べた基礎研究とその間の筆者の飼育体験から種苗生産過程を集約的に示し(Fig. V-1)、各過程における技法について検討を加えた。

なお、現在の魚類の種苗生産においては、放流用種苗のサイズが当初に比べて大型化したことに伴い、採卵および陸上水槽における初期飼育を狭義の「種苗生産」、種苗サイズまでの海面網生簀における飼育を「中間育成」と呼称するのが一般的である。しかし、クロマグロについては、後者にも衝突死という一大減耗期が存在するので、本研究では両者を合わせて広義の「種苗生産」とし、前者を「採卵および初期飼育」、後者を「中間育成」と称することにする。

V-1. 採卵

クロマグロの採卵は、親魚が巨大であるとともに採捕場所が遠く、熟卵保有個体の入手が困難であることから、天然産幼魚を活け込み、これを養成した親魚からの自然産卵を研究してきた。

その結果、和歌山県串本周辺海域における親魚の成熟年齢と個体の大きさは、一般的に満5歳で体重50～70kgである。産卵期は6～8月で、産卵水温は22～29℃であるが、産卵の可能性は、産卵前の5月中に水温が21.5℃以上に上昇し、以後それより低下しない場合、5月に20℃以上の水温を経験した後、6月に21.5℃以上の日が2週間以上連続した場合、および7月中旬から8月にかけて23℃以上を保った場合に高い。

しかし第Ⅰ章で述べたように、串本周辺海域における養成親魚の成熟年齢が満5歳であるとする、最初の親魚が育った1972年級群の成熟年が1977年で、1999年までに自然産卵の可能性があった年は23年を数える。ところが、そのうち自然産卵を認めたのは延べ7年のみであり、産卵した親魚群は1974年および1987年級群の2群に限られた。

串本海域での産卵が不順であるのは、同海域において急速に成熟を迎える4～5月および産卵期である6～8月の水温が、年によって大きく変動することにある(Fig. I-9)。故に、この海域で安定して受精卵を確保するためには、例えば、循環濾過式水槽を用い、水温調節を行うことが

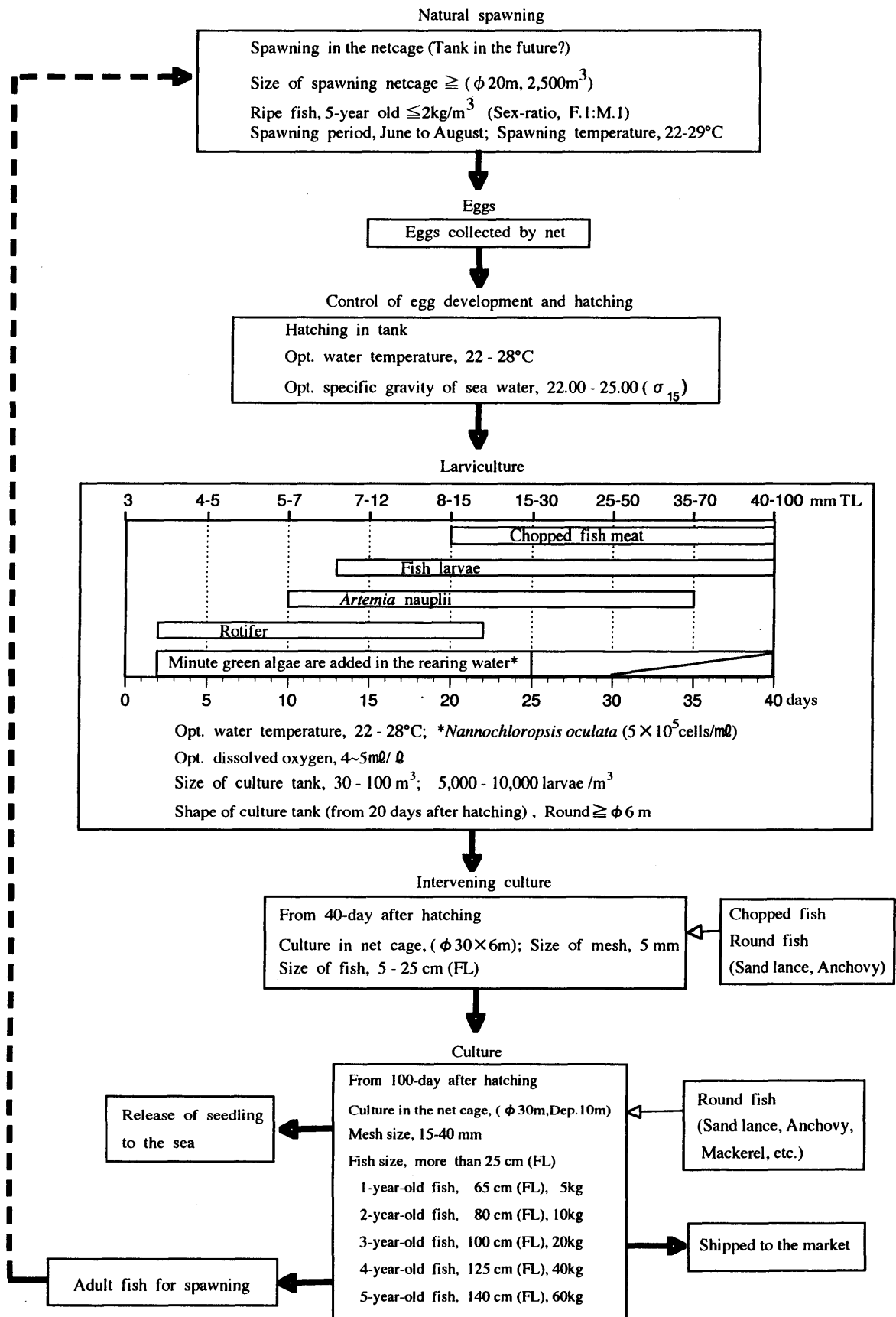


Fig. V-1. Diagram of the seedling production of the Pacific bluefin tuna.

不可欠である。陸上の循環濾過式水槽による採卵は、1999年に東京都葛西水族園における⁸³⁾、内径19 m、最大水深7 m（容積2,200 m³）の展示水槽での自然産卵が認められたことや、遠藤³³⁾が直径12 mの網生簀での自然産卵を報告している事例などから、その実現の可能性は高い。これらの事例に確実性を加味して想定するクロマグロの産卵水槽の大きさは、直径20 m以上、水深8 m以上（容積2,500 m³以上）となる。

産卵が近づくと雄親魚は黒化し、追尾行動が観察されるようになる。産卵は日没を中心に前後数時間にわたって行われる。産卵行動は、水面に跳ね上がり水しぶきを上げて行う場合と、水面下4～5 mで行う場合がある。このような産卵行動の違いが何に起因するのかは不明だが、前者の場合には目視確認が容易であり、後者の場合には確認し難い。そこで、点検用に小型の卵採集ネットを用意し、時々調査する必要がある。

クロマグロ卵は、無色透明の球形分離浮性卵で、1個の透明な油球を有している。平均卵径は0.93～1.02 mmであり、第1章で述べたように、水温が高いほど小さくなる傾向がある。網生簀における卵の採集には大型ネットを用いるが、卵径からみたその網目幅は約0.5 mmが適当である。また、クロマグロ卵は浮力が大きいので²⁶⁹⁾、産出卵の散逸を防ぎ採集効率を高めるために、産卵中の生簀内周には深さ2～3 mのシートの設置が必要である。

しかし、現在行っているこのような卵の採集方法は、作業に費やす労力も大きいという、散逸卵の完全な防止は不可能であり、実際の産卵量を知ることができない。従って、受精卵採集の合理化および正確なデータ収集とともに、安定した産卵を行わせるためにも、前述したような循環濾過式産卵水槽の設置が望ましい。

V-2. 孵化

卵の飼育管理は、流水水槽内に設置するゴース地生簀で行った方が水質保全面で管理しやすい。生簀の大きさは、生地規格幅から90×90×90 cmが適当である。ゴース生簀の網成りを良くするために底面4辺を固定し、卵が生簀内全体にゆっくり漂うように、中央に設置したエアーストーンによって通気を施す。卵の収容密度は、流水式であれば100万粒以下/m³とする。

クロマグロ卵の孵化適水温は25℃前後であり、50%以上の正常孵化率を示す孵化限界水温は21～29℃である（Fig. II-6）。孵化に適した海水比重は、通常自然海水におけるその範囲内では22.00（ σ_{15} ）以上である²⁷⁰⁾。孵化までに要する時間は、水温24℃で受精後約32時間であり、水温が高くなるほど短くなるが、卵は孵化数時間前から沈降するので、その前に飼育水槽に収容する方が良い。また、卵の酸素消費量はクッパー胞出現期以降急激に増加するので、孵化前には通気量を多くし、卵をできるだけ水中に浮遊させて沈降を防止する。しかし、通気は孵化仔魚にとっては大きな物理的な刺激となるので、孵化が完了し、仔魚が水中全体に浮遊し始めるのを確認したら、通気量を弱くすることが重要である。

V-3. 初期飼育

大島分室で1994～1996年および1998年に種苗生産を試みたが、延べ4年間の飼育結果の総括をTable V-1に示した。孵化直後の仔魚の大きさは平均全長約2.8 mmであるが、摂餌を開始する孵化後3日目には約4 mmとなる。その後、後期仔魚から稚魚期に移行する10 mm TL前後(孵化後15日目頃)までの成長は緩やかであるが、以後、顕著に速くなる。50 mm TLまで成長するのに必要な孵化後日数は、速い個体で30日、遅い個体で40日余りである。初期飼育における減耗は、Fig. V-2に示すように孵化後10日目までの初期減耗、およびpostflexion期～稚魚期における共喰いによる減耗が大きく、最も高かった1996年の生残率で0.4%であった(Table V-1)。

以上の飼育例と第Ⅲ、Ⅳ章で行った基礎実験のための飼育、および1979～1982年の飼育経験から、クロマグロの種苗量産技術の開発に重要と思われる水槽、環境、餌料系列などについて以下に検討を加える。

(1) 飼育水槽と仔魚の収容密度

飼育水槽の大きさは、孵化後15日目(10 mm TL)頃までは形状を問わず1 m³以上の水槽であれば飼育可能である。仔魚の収容密度は、初期餌料であるワムシ類の至適餌料密度と水質保全のバランスから、1万尾/m³前後が適当である。

孵化後15日目以後の水槽の大きさは20 m³以上を要し、できるだけ大きい方が望ましい。これは、孵化後10日目頃から共喰いが始まり、15日目以後に激しくなることや、25日目頃から突進遊泳-衝突が始まるので、これらによる減耗を低減する効果がある。1979～1982年の飼育が稚魚期で終了した原因は、餌料系列がほとんど現在と変わっていないこと、および当時は知られていなかったが、第Ⅲ～Ⅳ章で述べたように稚魚期以降のクロマグロに水槽壁への衝突死が多発することを考えると、飼育水槽の大きさによるものと断定できる。

Table V-1. The summary of the seedling production of the Pacific bluefin tuna
(Results in Ohshima Exp.St.)

| Year | 1994 | 1995 | 1996 | 1998 |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|--|
| No. of egg at the start ($\times 10^4$) | 264 | 223 | 95 | 318 |
| Tank used at the start (Shape · m ³ × No.) | Square · 50 × 2 Square · 20 × 14 | Round · 30 × 2 Square · 20 × 6 | Round · 30 × 3 | Round · 30 × 6 Square · 20 × 4 |
| Tank used at the end (Shape · m ³ × No.) | Square · 50 × 1 Square · 20 × 11 | Round · 30 × 6 Square · 20 × 5 | Round · 30 × 7 | Round · 30 × 6 Square · 20 × 6 Square · 30 × 4 |
| Days after hatching | 36～50 | 34～39 | ～38 | 41～54 |
| Survived number of fish | 1,872 | 8,071 | 3,841 | 5,476 |
| Survival rate (%) | 0.07 | 0.36 | 0.40 | 0.17 |
| Size at the end of the larviculture (mm TL) | 81.7 | 58.3 ± 3.3 | 54.0 ± 4.0 | 70.0 ± 9.0 |

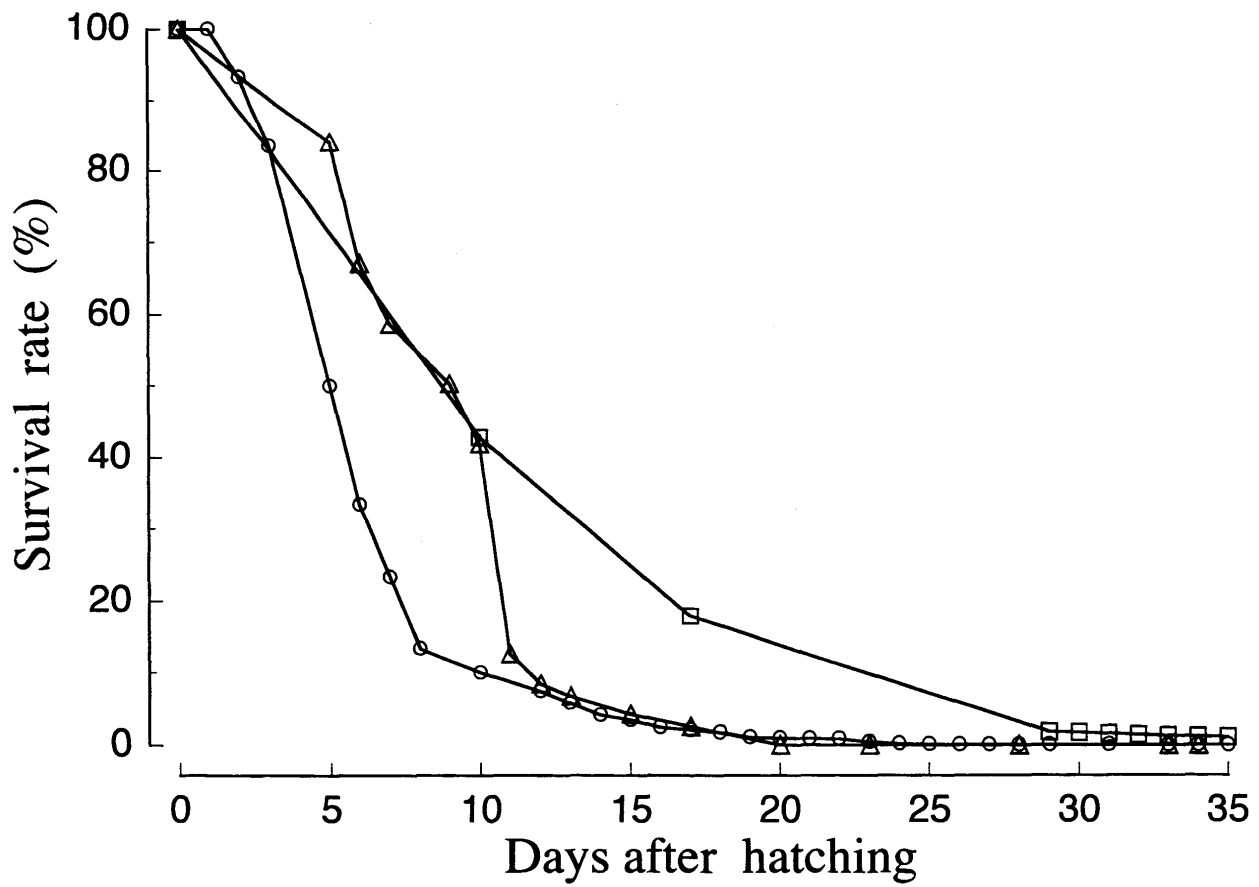


Fig. V-2. Survival during the early life stage of the Pacific bluefin tuna culture. □, tank-1 (20m³); ○, tank-2 (20m³); △, tank-3 (40m³).

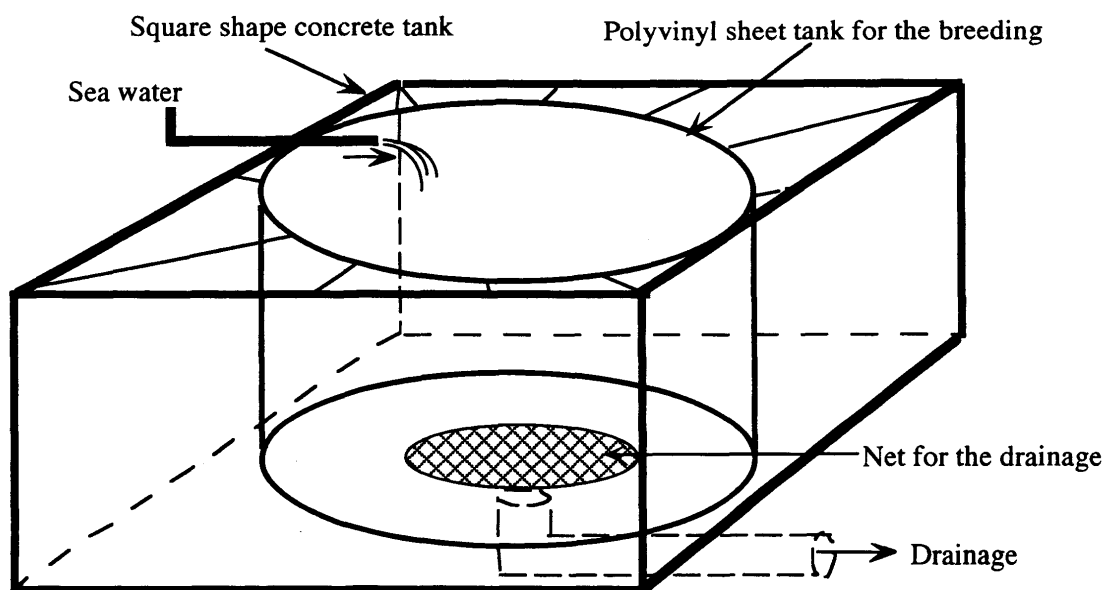


Fig. V-3. Collisional relaxation rearing method of the Pacific bluefin tuna in the square shape tank.

水槽の形状は、20日齢までは角形水槽でも問題ないが、以後の衝突死による減耗を低減するためには円形水槽の方が望ましい。また、水槽内には、作業用梯子、熱交換器などの突進遊泳時の衝突対象物となるような器物はできるだけ除去する。

しかし、現在の種苗生産用飼育水槽の形状は方形が多いので、その場合には、Fig. V-3に示すように、衝突時の衝撃緩和対策を兼ねて、内側に円筒形シート水槽を設置すると良い。シート水槽の中央底面には排水用のネット（網目幅5～10 mm）を取り付け、排泄物や残餌の除去も同時に行う。

(2) 飼育環境

近畿大学における飼育室の屋根は、農業用ビニールシート（不透明）と、遮光率80%の寒冷紗で葺いている。この場合、水槽内の水面における照度は、快晴時で約20,000 lx、雨天時で約1,000 lxであるが、その範囲内では特に支障はない。しかし、孵化後30日目頃（TL 30 mm以上）からは、光の変化が衝突死の原因となる突進遊泳を誘発するので注意を要する。第IV章で述べたように、稚魚から若魚期にかけてのクロマグロは、光や音などの僅かな環境変化に驚愕反応を示し、突進遊泳によって水槽壁へ衝突する。特に、日の出および日没時には巡航遊泳速度が速くなり、行動が不安定になって突進頻度が高くなる。ゆえに、直射光、特に朝日が飼育水槽内へ入らないようにする。

また、突進誘発の防除には、常夜灯の設置は効果がある。しかし、漏電または停電などの事故によって人工照明が消灯および点灯する場合、激しい突進遊泳を誘発するので電源の対策が重要である。

光とともに突進遊泳を誘発する要因の一つに突発的な騒音がある。水槽周辺での器具の移動や歩行には十分留意する必要がある。また、筆者の経験では、水槽横の空き地で観光客や近隣の子供達が花火を揚げた直後に衝突死が多発したことを認めた。特に、種苗生産時期が夏季になるので注意を要する。

(3) 飼育水

飼育最適水温は25～26℃であると考えられるが、23～29℃であれば支障はないので、その範囲内であれば常温で飼育できる。飼育水は孵化後5日目頃まで止水とし、餌付け以後は水槽容積×日令×0.1の割合を目安に換水を行いながら、この換水率に準じた流水飼育に移行する。飼育水には微細藻類(*Nannochloropsis* など)を 5×10^5 cells/ml程度の密度で添加する。この添加は、水質保全だけでなく共喰い行動を緩和するのにも効果があるので、供給できる限り最低孵化後20日目頃まで続ける。

仔魚期の流水量は、前述の換水率に準じて行うが、孵化後15日目以降、稚魚期に移行してからの流水量と酸素濃度には注意が必要である。即ち、第III章で述べたように、稚魚後期のクロマグロの酸素消費量は同ステージにおけるブリの3倍にも達し、致死酸素濃度も3 ml/l前後と他魚種よりかなり高いからである。例えば、孵化後23日目（25～35 mm TL）で一夜にして全滅させた例がある。この時のクロマグロは、前夜まで疾病も認められず正常であったことや、餌料として給与したイシダイ仔魚が翌朝も正常であったことから、酸素欠乏がその有力な原因として考えられた。特に、20日齢以後のクロマグロの成長は著しいので、餌料が魚肉（将来は配合飼料）

に切り替わった後は、溶存酸素量が常に 4 ml/l 以上であることを確認し、流水量および純酸素添加量の調整に万全を期することが重要である。

(4) 餌料系列

天然のカツオ・マグロ類仔魚の主たる餌料生物はカイアシ類であることが知られているが^{178, 197, 271)}、人工種苗生産では大量に安定して供給できることが条件となる。従って、その大量培養ができない現状での餌料系列は、量産が可能となっている基本的な餌料系列（初期，ワムシ類；2期，アルテミア幼生；後期，配合飼料および魚肉）をベースに設定することになる。しかし、クロマグロの場合にはこの基本的な餌料系列では飼育できない。クロマグロがマダイやヒラメと決定的に異なるのは、現在市販されている配合飼料を摂餌しないことであり、2期餌料と後期餌料の間にさらに大型の餌料生物が不可欠である。故に、現状におけるクロマグロの餌料系列は、初期，ワムシ類；2期，アルテミアのノープリウス；3期，孵化仔魚および魚卵；後期，魚肉となる。以下にそれらについて順に述べる。

初期餌料：初期餌料は多くの魚類で一般的に用いられているワムシ類であるが、シオミズツボワムシ、*Brachionus plicatilis* と S 型ワムシ、*Brachionus rotundiformis* では、口が大きいマグロ類の場合、孵化後 5 日目頃からは前者の方が望ましいと考えられる。しかし、シオミズツボワムシは高水温期の安定培養が困難であるため、本研究では S 型ワムシを継続して使用した。

仔魚は、水温が 24°C 前後であれば、孵化後 3 日目に摂餌開始時期となるので、ワムシ類の給餌を開始するが、 25°C 以上ではそれより早くなり孵化後 2 日目となる。ワムシの給餌期間は孵化後 20 日目頃（8-15 mm, TL）までである。なお、その栄養強化については、現在のところ脂質成分についてのみ論じられており、必須脂肪酸であるエイコサペンタエン酸（EPA）およびドコサヘキサエン酸（DHA）を中心にした強化が図られている。しかし、クロマグロについての栄養要求は未だ明らかにされていない。従って、現状では外洋性魚類のシマアジで知られているレベルでの栄養強化に準じた。クロマグロの種苗生産における第 1 減耗期、すなわち、孵化後 10 日目頃までに認められる減耗要因の 1 つには、用いるワムシ類の質とともに、その給餌方法を挙げることができる。

そこで本研究では、DHA 強化剤のマリングロス（日清サイエンス株式会社製）で二次培養を行った S 型ワムシを用い、摂餌開始期（孵化後 3 および 4 日目）における最適給餌密度および孵化後 7 日目までの成長に伴うワムシサイズ選択性の変化を調べた²⁷²⁾。その結果、摂餌開始日の午前中における平均ワムシ摂餌量（消化管内ワムシ数）は、 5 ind./ml でやや低く、 $10\sim 30\text{ ind./ml}$ で 1 尾当たり $10\sim 15$ 個体を示し、 40 ind./ml では孵化後 4 日目以降、顕著な水質悪化（溶存酸素量および pH の低下）とともに摂餌量が低下する傾向を認めた。故に、 5 ind./ml での飼育も十分可能であるが、摂餌開始期の最適なワムシ給餌密度の範囲は $10\sim 30\text{ ind./ml}$ である。

仔魚の摂餌は日中にのみ認められ、1 尾の仔魚が摂餌したワムシ数の最大は、孵化後 3 日目では 24 個体、4 日目では 28 個体であり、照度が十分な日中の摂餌率はほぼ 100% であった。このように、摂餌開始期のワムシ摂餌量が既往の多くの魚種に比べて最も多い部類に属することや（澤田未発表）、高い摂餌率から、クロマグロは最も高い摂餌能力を示す魚種の 1 つといえる。

給餌したワムシのサイズはそれぞれ、被甲長（LL）、 $100\sim 239\text{ }\mu\text{m}$ ；被甲幅（LW）、 $60\sim 179\text{ }\mu\text{m}$ の範囲であったが、仔魚の消化管内ワムシのそれも同範囲にあり、小型のワムシも摂餌す

ることがわかった (Fig. V-4 および 5)。

しかし、摂餌選択性をみると、LL および LW の何れに対しても、摂餌開始日から日毎に大きなサイズにシフトする傾向が認められ (Table V-2 および 3)、大型個体を選別して与えるか、L 型ワムシを用いることが有効であると考えられる。

2 期餌料：アルテミア幼生を孵化後 10 日目頃 (5~7mm TL) から与える。このステージは脊索尾端の上屈が始まる flexion 期であり、個体間に大小差が出始め、以後その差が拡大して共喰いが激しくなる。従って、給餌方法によっては共喰いによる減耗が大きくなるので注意を要する。餌料面での最大の共喰い防止策は、空腹にさせないことにつきる。なお、アルテミアのノープリウスは、EPA および DHA の強化を図ってから与えるが、3 期餌料である孵化仔魚を併用している限り、多量投与の弊害は認められなかった。この餌料の給餌期間は、大型個体に限って言えば孵化後 20 日目までで良いが、小型個体の減耗を防ぐためには孵化後 25 日目頃 (15~30 mm TL) まで不可欠である。

3 期餌料：クロマグロ飼育における 3 期餌料は、マダイやヒラメなどのように、アルテミアのノープリウスから配合飼料あるいは魚肉へ引き継ぐことが出来ない現状から重要な餌料となる。この 3 期餌料として最も有効なのは、1979 年の飼育以来用いている魚類の孵化仔魚および魚卵である。これらの魚種は、産卵期がクロマグロと同じかそれに近く、毎日大量に産卵し、卵の管理が容易な分離浮性卵を産む多回産卵魚が望ましい。これらの条件にかなう魚種として、イシダイ、マダイが挙げられる。ただし、有効に利用するためには、水温調節によって、クロマグロの種苗生産時期まで産卵を抑制する必要がある。その他に産卵量は少ないが、産卵期がほぼ合致することで、シロギス卵も補助的に利用することができる。

孵化仔魚を餌として、アルテミアの給餌開始期と同じ孵化後 10 日目頃から給与すれば摂餌するが、これを摂餌できる個体とできない個体との間に成長差が著しく拡大する。そこで、共喰いによる減耗低減のためには、給餌開始を数日遅らせて、孵化後 13 日目頃 (6~8 mm TL) からとした方が良い。孵化仔魚の給与開始後約 1 週間で稚魚への移行期 (10~13 mm TL) に達し、その後の成長は顕著に速くなる。故に、以後の摂餌量はこれに比例して激増するため、孵化仔魚の準備に労力を増すことになるが、稚魚期に達すれば卵を摂餌できるようになるので、孵化仔魚の必要量を確保した残りは卵の状態で給餌する。

ところで、餌料生物としての孵化仔魚および魚卵の充足率が低下するほど、クロマグロの個体間に成長差をもたらし、共喰いによる減耗が大きくなる。必須給餌期間は、魚肉に切り替わる孵化後 25 日目 (15~30 mm TL) 頃までであるが、小型個体の減耗低減のためには、孵化後 30 日目 (25~50 mm TL) を過ぎるまで可能な限り給餌した方が良い。すなわち、配合飼料が開発されない限り、孵化後 15 日目頃からの 10 日間に、アルテミアのノープリウスと孵化仔魚および魚卵を十分供給できるか否かが、現状でのクロマグロ種苗量産の成否を決定するといえる。なお、この間に天然産の中大型カイアシ類が供給できるならば、併用給餌すればさらに良い。

後期餌料：現在までのところ、市販配合飼料への餌付けができないので、最終餌料は魚肉ということになる。魚肉への餌付けは孵化後 20 日目 (10~15 mm TL) 頃から始めるが、用いる種類としてはできるだけ小さなイワシ類シラスが適当であり、これを切断して与える。数日でこれに餌付くので、栄養面を考えると早めに小型のイカナゴに切り替えた方が良い。

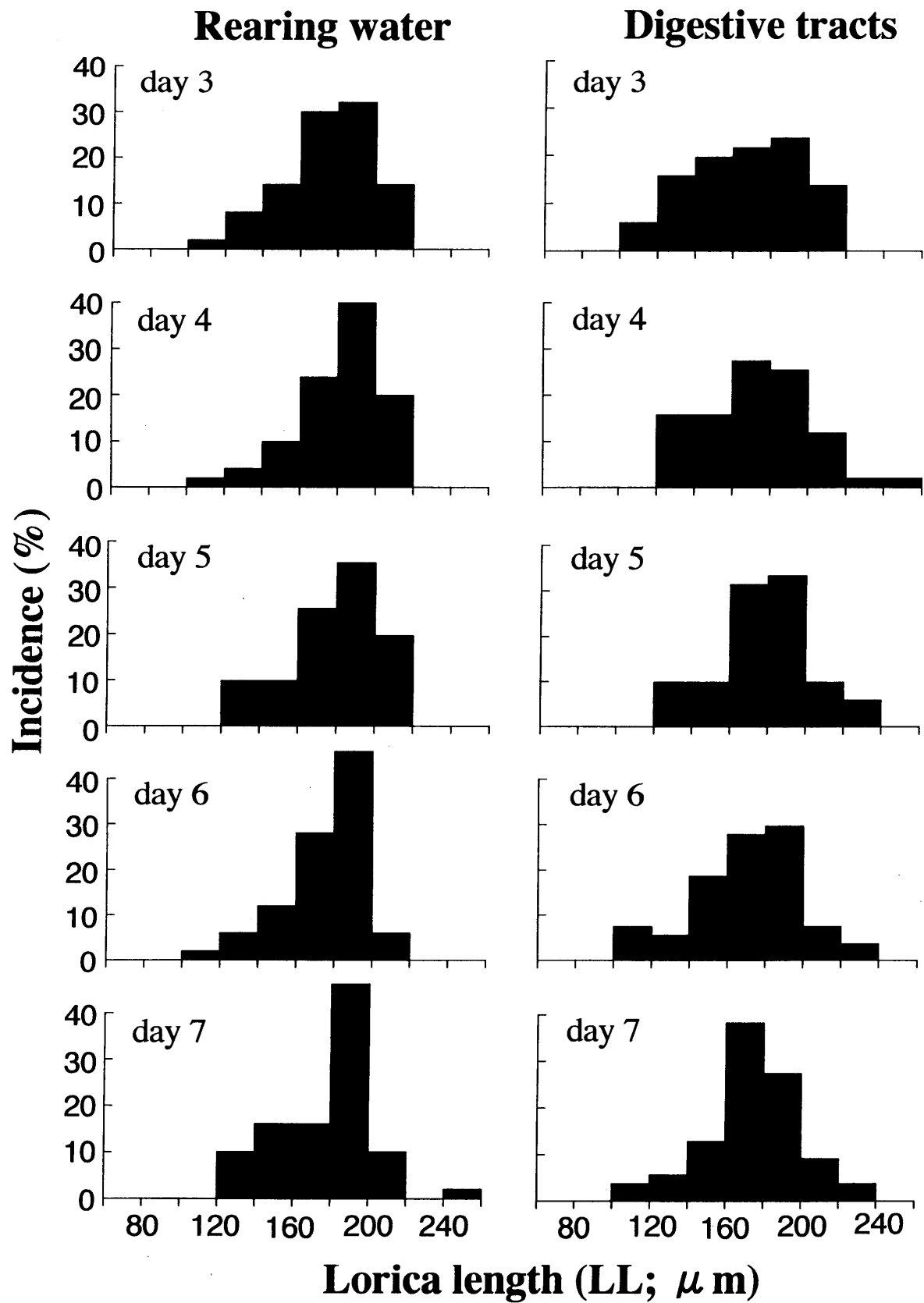


Fig. V-4. Size composition of rotifer lorica length (LL) in the rearing water and in the gut of the Pacific bluefin tuna larvae.

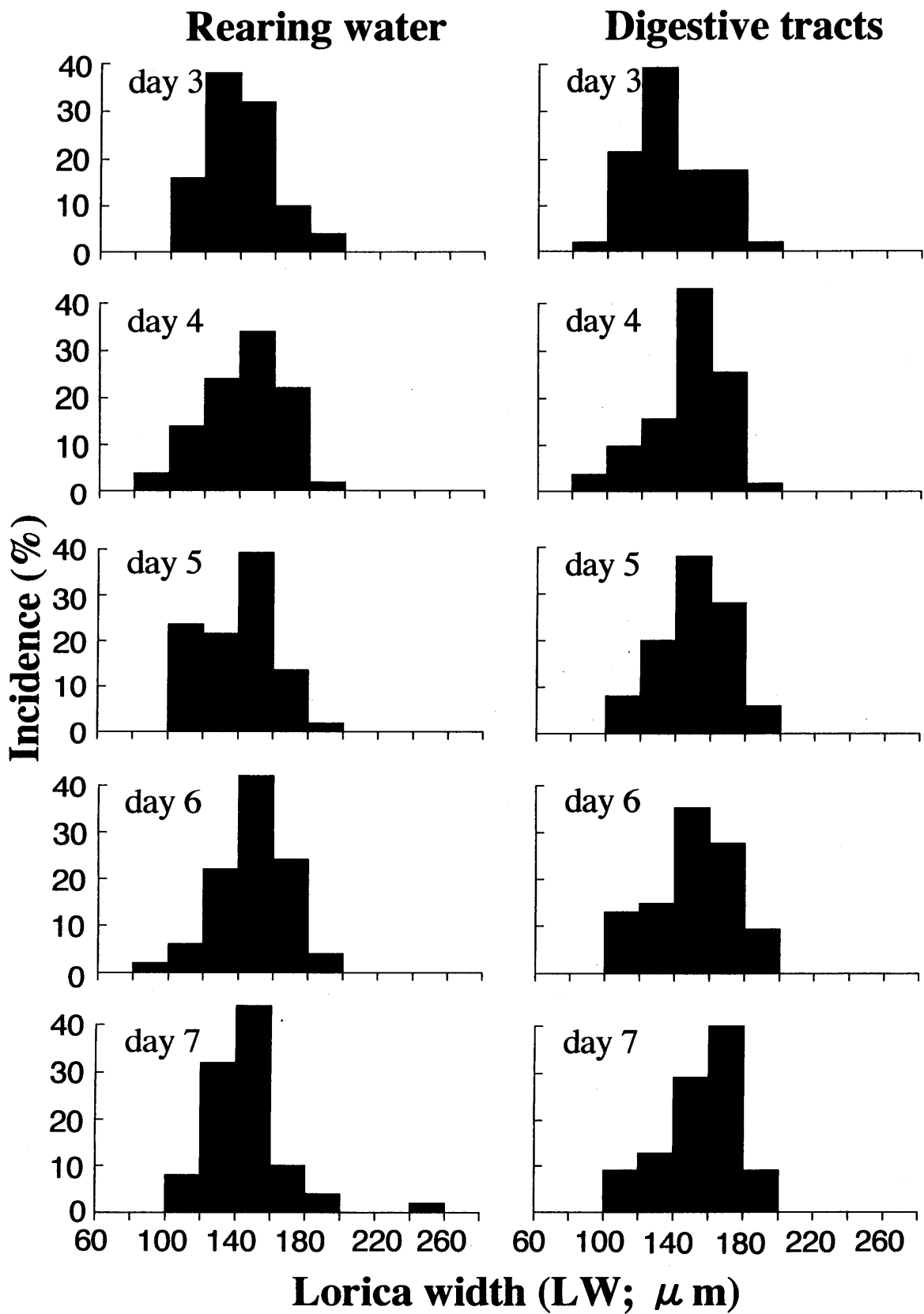


Fig. V-5. Size composition of rotifer lorica width (LW) in the rearing water and in the gut of the Pacific bluefin tuna larvae.

Table V-2. Chesson's food selectivity index α of the Pacific bluefin tuna larvae for rotifer lorica length *

| Lorica length (μ m) | Days after hatching | | | | |
|--------------------------|---------------------|------|------|------|------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 100~119 | 0.34 | 0.11 | | 0.40 | 0 |
| 120~139 | 0.22 | 0.44 | 0.21 | 0.10 | 0.08 |
| 140~159 | 0.16 | 0.18 | 0.21 | 0.18 | 0.11 |
| 160~179 | 0.08 | 0.13 | 0.26 | 0.11 | 0.34 |
| 180~199 | 0.08 | 0.07 | 0.20 | 0.07 | 0.08 |
| 200~219 | 0.11 | 0.07 | 0.11 | 0.14 | 0.13 |
| 220~239 | | + | + | + | 0.26 |
| 240~259 | | + | | | 0 |

*On day 4, day 6, and day 7, $\alpha > 0.17$, $\alpha = 0.17$, and $\alpha < 0.17$ shows positive, neutral, and negative selectivity, respectively. On day 5, $\alpha > 0.2$, $\alpha = 0.2$, and $\alpha < 0.2$ shows positive, neutral, and negative selectivity, respectively. Crosses indicate that rotifers were observed in the larval gut but not in the rearing water. Blanks indicate that rotifers were not observed neither in the larval gut and the rearing water.

Table V-3. Chesson's food selectivity index α of the Pacific bluefin tuna larvae for rotifer lorica width *

| Lorica width (μ m) | Days after hatching | | | | |
|-------------------------|---------------------|------|------|------|------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 60~79 | + | 0.17 | | 0 | |
| 80~99 | 0.26 | 0.12 | 0.05 | 0.30 | 0.31 |
| 100~119 | 0.20 | 0.11 | 0.15 | 0.09 | 0.05 |
| 120~139 | 0.11 | 0.22 | 0.15 | 0.12 | 0.08 |
| 140~159 | 0.34 | 0.20 | 0.32 | 0.16 | 0.47 |
| 160~179 | 0.10 | 0.17 | 0.32 | 0.32 | 0.27 |

*On day 4, day 6, and day 7, $\alpha > 0.17$, $\alpha = 0.17$, and $\alpha < 0.17$ shows positive, neutral, and negative selectivity, respectively. On day 3 and day 5, $\alpha > 0.2$, $\alpha = 0.2$, and $\alpha < 0.2$ shows positive, neutral, and negative selectivity, respectively. Cross indicates that rotifers were observed in the larval gut but not in the rearing water. Blanks indicate that rotifers were not observed neither in the larval gut and the rearing water.

以上、クロマグロの飼育餌料系列について述べてきたが、餌料の種類がすべて生物餌料となるため、これらを安定して十分に供給するためには多大な労力と困難を伴う。クロマグロと同じサバ科に属するマサバ²⁷³⁾では、初期減耗が少なく、postflexion 期から稚魚への移行期（孵化後 10~12 日目, 11~15 mm TL）の早い段階から市販の配合飼料を摂餌し、共喰いや衝突死現象もみられない。これらの事例と本研究で明らかにした知見などから、クロマグロの著しい特異性が窺われ、飼育技術の開発にはかなりの困難を伴うものと思われるが、今後の種苗量産化のためには、栄養要求および嗜好性を早急に調べて、クロマグロ用人工配合飼料を開発し、3 期餌料の簡略化を図ることが最も重要である。

(5) 疾病

多くの魚類の種苗生産過程において、様々な細菌症、寄生虫症およびウイルス性疾病が認められるが、クロマグロの飼育例で、現在までに認められた疾病は、1994年に認められたエピテリオシスティス類症および1996年に認められたスクーチカ症各1例と鰓蓋骨形成不全のみである。

本実験中におけるエピテリオシスティス類症の発症は、小型水槽での1回のみであり、被害は軽微であった。しかし、本症はタイ類やブリ類など多くの魚種の種苗生産過程でみられ、仔魚期に発症すると被害が大きい。今後、クロマグロの種苗生産でも発症の可能性が大きいと思われるので注意が必要である。

スクーチカ症は、70 m³容水槽での飼育中、孵化後14日目(8~10 mm TL)に白濁して浮上斃死した個体を検鏡して確認したものである(水温26℃)。なおこの時、同水槽内で活発に遊泳する個体にはその寄生が認められなかった。この疾病で、孵化後17日目までの3日間に約半数が斃死したが、その間に行った浮上斃死個体の速やかな除去、底面および水面の汚れの除去、流量の増加などの処置によって、それ以上の感染を防ぐことができた。この頃からのクロマグロの成長は速く、孵化後18日目以後での同症は認められなくなった。

鰓蓋骨形成不全は左右何れかの鰓蓋でみられ、鰓蓋が完全には形成されず、鰓の一部が露出する状態を呈し、左右両方に発現した例は少ない。発生率は1994および1995年で10%前後であった。この症状はマダイ⁷⁴⁾でも認められるが、筆者が体験したブリ、シマアジなど多くの魚類でも種苗生産技術開発初期にみられた。発症原因は不明であるが、餌料または環境の不備にあると思われる。この症例は前述の他魚種の場合、量産技術の向上とともに減少し現在ではほとんどみられないことや、クロマグロでも、1996年以後の飼育例での発生率は減少していることから、量産技術の向上に伴って解消できるものと推察される。

(6) 選別

稚魚期に達すると、魚種によっては共喰い現象が認められるようになる。成長の速いクロマグロでは個体間の大小差の拡大も速い。すなわち、第Ⅲ章で述べたように、孵化後10日目(5~7 mm TL)を過ぎた頃から稚魚期まで共喰いによる減耗が激しくなる。例え十分な餌料の供給によって共喰いによる減耗を低減できても、小型の個体は、大型の個体から受ける威圧ストレスによって成長が停滞するので選別は必要である。全長10 mm前後の仔稚魚の選別に要するハンドリングについては、今後その技法を開発していかなければならない。初期の減耗対策が進み、生残率が高くなればそれも可能と思われるが、現在のところでは、擦れ易いという概念のもとに、小型個体を掬いにとって別の水槽へ隔離するという方法で選別する。

V-4. 中間育成

大島分室で1994~1996年および1998年の延べ4年間に試みた種苗生産で得られた稚魚の、沖出し1ヶ月後までの中間育成の結果をTable V-4に示した。この経験から、沖出し時のハンドリング、餌料、衝突死による減耗の防除対策などを以下に述べる。

Table V-4. Intervening culture result of the Pacific bluefin tuna in net cage (Ohshima Exp.St.)

| Year | 1994 | 1995 | 1996 | 1998 |
|--|--------|---------|---------|---------|
| No. of fish at the start | 1,872 | 8,071 | 3,841 | 5,476 |
| Total length (cm) | 8.2 | 5.8±0.3 | 5.4±0.4 | 7.0±0.9 |
| Shape and size of the net cage | | | | |
| Shape | Square | Octagon | Octagon | Round |
| Length (m) | 6 | 12 | 12 | 30 |
| Area (㎡) | 36 | 120 | 120 | 706.5 |
| Depth (m) | 3 | 3 | 4 | 6 |
| Volume (㎡) | 108 | 480 | 480 | 4,239 |
| Width of the mesh (mm) | 6 | 6 | 6 | 5 |
| Survival number of fish after 1 month. | 43 | 2,007 | 630 | 2,718 |
| Survival rate after 1 month (%) | 2.3 | 24.9 | 16.4 | 49.6 |

(1) 沖出し

クロマグロがハンドリングによる擦れと酸欠に弱いことから、水槽から稚魚を取り上げるにあたっては細心の注意が必要である。飼育水の水位を下げた後、稚魚をポリエチレンシートで巻き取って集め、ポリエチレン製の袋で掬って船上の水槽まで輸送する。同様にして、生簀に到着した船上の水槽から再び稚魚を掬い揚げて生簀に収容する。この間の作業を手早く行うことがその後の生残率に大きく影響する。今後は、細かいメッシュのタモ網を用いる方法など、量産のためにはハンドリング方法および手順を改善する必要がある。

(2) 飼育餌料

中間育成初期の餌料には小型のイカナゴが適しており、稚魚の大きさに合わせて切断して与える。生餌はできるだけ丸のまま与えた方が効率が良いので、クロマグロがそれらを丸のまま摂餌できる大きさに成長すれば、カタクチイワシを併用する。当初の給餌回数は1日に4～6回が適当である。なお、これらの餌料には総合ビタミン剤を添加する。その後に用いる餌料は、成長に伴ってマイワシ、サバ、アジなど、成魚用に準じる。今後は、仔稚魚用と同様に、安定した飼育成績の得られる人工配合飼料の開発が必要である。

(3) 衝突死防除対策と網生簀の大きさ

1995 および 1996 年における沖出し後 1 ヶ月間の減耗は、Fig. V-6 に示したように 90% 以上に達した。これは第 IV 章で述べたように生簀網への衝突によるものである。クロマグロの衝突死は、光や音などの環境変化に対する驚愕反応によって突進遊泳を行い、障害物を回避できないことから発生するものと推察される。成魚でも時に観察されるが、特に全長 50 から 200 mm 前後までの間で頻発する。衝突死の原因としては、栄養的欠陥による神経系組織の異常なども疑われるところであるが、本研究で明らかにしたように、主な原因は遊泳能力に関する内部組織および外部形態の発達過程の違いにあるものと推察された。即ち、第 IV 章で述べたように、この発育段

階で体側筋や尾鰭の発達が著しく、遊泳推進力が顕著に高まるのに対して、胸鰭や腹鰭および尾柄隆起縁の発達など、揚力獲得や制御機能を有する器官は未発達な状態であり、体長に対するこれらの比が未成魚・成魚の水準に達するのは、200~300 mm BLと遅いことによると考えられる。即ち、生簀網への衝突は、突進遊泳の起点から、その持続距離もしくは衝突回避体勢を得る地点までの距離内に生簀網が存在することによる。その距離は未だ明らかではないが、現状における衝突死の低減対策としては、陸上水槽における場合と同様に、網生簀を広くする以外に方法がない。これまでの経験では、1辺が6 mより12 m、12 mより直径30 mの生簀というように、面積が大きいほど生残率が高くなる (Table V-4)。

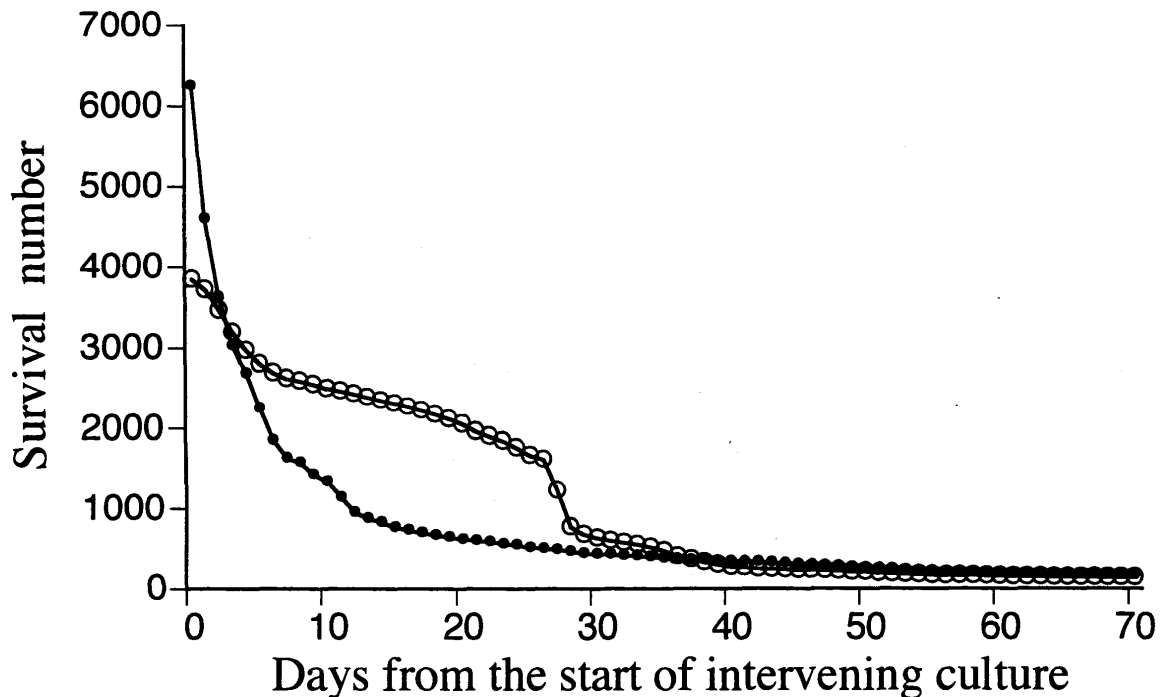


Fig. V-6. Fluctuation of survival number of the artificial hatched Pacific bluefin tuna, *T. thynnus orientalis* in net cage. ●, 1995; ○, 1996.

回遊魚であるブリやカンパチにしても、成長に伴って大きな生簀を必要とするが、稚魚期には一辺が3 mでもまったく問題はない。また、クロマグロにしても、天然ヨコワ（全長250 mm前後）の活け込みには1辺12 mの生簀を用いることができる。しかし、稚魚の沖出し用には、直径30 m以上の大型生簀が必要と考える。

なお、生簀網の目合は25節以下の細かいものほど良いが、網の汚れと海水交流の関係から30節が適当である。25節を用いた場合、稚魚が衝突に近い状態で網に接触した際に鰓が網目に掛かり易くなり、同部位の損傷個体が多数出現する。

その他の衝突死防除対策としては、突進遊泳を誘発させる夜間の不規則な光を如何に遮るかである。これまでの経験では、付近で操業する漁船の集魚灯、および陸上の道路を走行する自動車のヘッドライトが差し込むと衝突死が増加することを認めている。この対策として、生簀の周囲に遮光幕を張ったところ、衝突死による減耗をかなり低減できた。

今後は、神経系の組織学的研究と餌飼料の栄養学的研究などを中心に、驚愕反応を和らげ突進

遊泳誘発を抑制する技法を開発し、環境対策と合わせて、衝突による減耗の防除を図ることが重要課題であると考ええる。

V-5. 人工種苗の実用化および親魚養成-完全養殖

資源増強のための放流は、1995年9月21日の和歌山県水産祭の記念行事として、本研究で飼育した孵化後53日目（平均全長151 mm）の若魚200尾を供して行ったのが最初であった。放流用人工種苗のハンドリングや標識装着技術については、日本栽培漁業協会を中心とした報告があり^{206, 207)}、前者については明るい見通しが得られているが、後者については、体表装着タグの場合、クロマグロが高速遊泳魚であることによって受ける抵抗が大きく、装着部位の傷の拡大や脱落率が高いので今後の検討課題である。また、大量の種苗を放流するためには、若魚期までの衝突による減耗を考えると、これに対する有効な対策が見出せない限り、そのサイズを全長50～70 mm とするのが適当かもしれない。

養殖用種苗としては、本研究で試みて得た人工生産クロマグロを、第I章の親魚養成法によって育成を図ったところ、1994年産の生残数は孵化後246日後に0となった。しかし、本研究で明らかにした稚魚から若魚期における衝突多発現象の一要因を検討し、中間育成用網生簀のサイズを大きくしたところ、これに伴って生残率は高くなり、2000年6月現在で、1995年産、17尾；1996年産、35尾；1998年産、400尾がそれぞれ生存し、親魚養成に向けて飼育を継続している。これらはそれぞれ、体重20～65 kg（満5歳）、体重20～30 kg（満4歳）および体重5～15 kg（満2歳）に成長し、そのうち、1995年産は少ない生存尾数ながら成熟年齢に達した。なお、2001年2月に調査のため釣り上げた1998年産の人工孵化クロマグロ（孵化後2.5年）は、尾叉長120.8 cm、体重38.9 kgに成長しており（Fig. V-7）、天然産を養成した場合の成長と大差なかった。本研究によって実用種苗の生産を初めて達成することができたが、これらの人工生産親魚から熟卵を得ることができればFig. V-1に示した破線部分が繋がり、いわゆる「完全養殖」が達成される。

今後は、放流用および養殖用種苗量産化のために、これまで集積してきた基礎知見に基づいた生理生態・飼料栄養に関する研究をさらに進め、初期の第1、第2減耗期、ならびに衝突死による第3減耗期の防除対策を確立しなければならない。



Fig. V-7. 2.5-year-old fish of the artificial hatched Pacific bluefin tuna. Fork length, 120.8 cm; Body weight, 38.9 kg (Feb. 8, 2001).

要 約

水産業における国際的重要魚種の一つであるクロマグロは、資源量の減少から年毎に資源保護の機運が高まりつつあり、放流および養殖用の人工種苗生産技術の開発が強く求められている。しかしながら、本種が大洋横断回遊を行い、親魚が巨大であることと、擦れ易く扱い難いことから増養殖に関する研究は著しく少なく、現在まで人工種苗を養殖用に供したという報告がない。クロマグロ人工種苗量産のためには、安定採卵技法の確立とともに、仔稚魚の発育に伴う総合的な基礎知見の集積が不可欠であり、これに基づいた飼育技術の開発が重要である。このような観点から、本研究では養成親魚の産卵生態、卵発生、仔稚魚の発育に伴う外部形態および内部形態、遊泳能力と減耗期などの種苗生産に関わる一連の基礎知見集積を図るとともに、人工生産魚の養殖用種苗への実用化を試み、各発育段階における仔稚魚の飼育技法に検討を加えた。

I. 1987年に採捕した天然産幼魚を親魚に養成し、成熟および産卵を観察し、次の結果を得た。(1) 串本周辺海域での産卵期は、6月中旬から8月中旬の約2ヶ月間と推定された。(2) 自然産卵が認められた水温範囲は21.6~29.2℃であった。(3) 成熟雌個体の卵巣内の卵径組成は多峰型を示し、産卵様式は多回性であると断定した。(4) 精子は全長約35 μ mで、頭部、中片部および尾部から構成され、硬骨魚類の一般的な形態を示した。(5) 卵は無色透明、球形の分離浮性卵で、その平均直径は0.926~1.015 mmの範囲を示し、水温が高いほど小さくなる傾向を示した。

II. 採卵から孵化までの卵管理技術の基礎となる発生に伴う生物学的、化学的变化を調べた。

1. 卵発生過程を観察するとともに、発生速度、孵化所要時間および孵化率に及ぼす水温の影響を調べ、次の結果を得た。卵内発生の各段階は一般硬骨魚と大差なく、水温 24℃の条件下で産卵 32 時間後から孵化した。50%以上の正常孵化率を示した水温範囲（孵化限界水温）は 21.2～29.8℃、最高正常孵化率および最低奇形率を示した水温は 25℃付近であったことから、クロマグロ卵の最適孵化水温は 25℃付近と推察した。

2. 発生に伴う卵の生化学成分と酵素活性の変動を調べ、次の結果を得た。発生に伴う卵の水分、全窒素およびリン脂質含量に変化はなかった。遊離アミノ酸含量は発生に伴って僅かに減少したが、タンパク質含量は徐々に増加した。卵割初期の主要構成成分であるトリグリセライド (TG) 含量は、囊胚後期以降急激に減少し、孵化直前には初期の 1/3 に達したことから、主に TG を卵発生中のエネルギー源として消費することがわかった。アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ、アラニンアミノトランスフェラーゼ、クレアチンキナーゼ、乳酸デヒドロゲナーゼおよびアルカリフォスファターゼなどの活性の変動から、クッパー胞出現前後に器官の分化および形成が促進されることが示唆された。

Ⅲ. 仔稚魚を飼育して、発育に伴う外部形態の変化、消化器官の形成と酵素活性の変動、並びに体側筋の発達と酸素消費量の変動を調べた。

1. 初期発育に伴う外部形態の変化を調べ、次の結果を得た。孵化仔魚の平均体長 (BL) は 2.83 mm で、20 日目 (10.6 mm BL) までの成長はマダイと大差なかったが、以後、顕著に速くなった。孵化仔魚は約 4 mm BL までに、マグロ属の前屈曲仔魚に特有の黒色素胞パターンを発達させた。マグロ類仔稚魚を同定する上で形態上の特徴として役立つ赤色素胞は 4.63 mm BL で軀幹部背側後部に、以後、尾鰭鰭膜、下顎および下尾骨にそれぞれ出現したが、これらは体長 19.72 mm までにすべて消失した。顎歯は 5～6 mm BL で出現した。頭部の棘は、おおよそ 7 mm BL までに発達し、38 mm BL までに消失した。脊索末端の屈曲は 6～8 mm BL (10 日齢前後) で認めた。鰭条数は 10 mm BL (20 日齢前後) で成魚と同数に達し稚魚期へ移行した。鱗の出現は 27 mm BL で始まった。体各部の相対成長は、3～4 個の成長屈折点を持つ多相アロメトリーで、前期仔魚から後期仔魚への移行期、脊索末端の屈曲期、後期仔魚から稚魚への移行期に、それぞれ成長屈折点の集中が認められ、生理生態学的な変化が示唆された。

2. 稚魚から若魚における外部形態の発育過程を調べ、次の結果を得た。稚魚期以降の絶対成長（平均体長）は、既往の種苗生産魚種の何れに比べても著しく速く、29 日齢、32.5 mm；50 日齢、140 mm となり、串本海域で毎年 8 月を中心に採捕される幼魚の体長 200～300 mm に達するのに要する時間は約 2.5 カ月であることが分かった。魚体各部の相対成長は、それぞれ体長 80～100 mm の間に成長屈折点が集中してみられ、これ以降多くの部位で体長に対する比率が一定となり、成魚のそれにほぼ等しくなることが分かった。またこの頃、サバ型魚類の特徴である小離鰭の独立および尾柄主隆起縁の発現が観察され、遊泳行動にも大きな変化が認められたことなどから、体長 80～100 mm が稚魚期から若魚期への移行期に当たることが分かった。なお、この時期を中心にクロマグロに特有の突進遊泳による衝突死が激増し、一大減耗期を呈した。また、200 mm BL には尾柄高の体長に対する比率も成魚とほぼ等しくなり、遊泳行動にも変化がみられたことから、未成魚期への移行期に当たると推察された。

3. 初期発育における消化器官の発達と消化酵素活性の変動を調べ、次の結果を得た。孵化後 36 時間目までに各臓器が形成され、トリプシン様酵素およびアミラーゼ活性は摂餌開始後成

長に伴い増加した。脊索末端の屈曲期(10日齢頃)までに腸の回転が完了, 咽頭歯および食道の粘液細胞が分化し, 以後, 胃盲嚢, 胃腺および幽門垂が形成され始めた。ペプシン様酵素活性は胃腺の形成に伴って増加し, postflexion 期から稚魚への移行期にかけて胃の機能および幽門垂が著しく発達した。11 から 26 日齢にかけて, 体長に対する肛門前長の比が著しく増加したことから, 消化系は脊索末端の屈曲期までは主として質的に発達し, それ以降は量的な発達が伴うことが示唆された。

4. 遊泳の原動力となる体側筋について, 稚魚期から若魚期(23.1~156.0 mm BL)における発達過程を調べ, 次の結果を得た。血合肉(赤色筋)および普通肉(白色筋)の体積は, 成長に伴って指数関数的に増加したが, 相対成長式には, ともに 80 mm BL で 1 つの成長屈折点を有し, それ以降有意に高い割合で増加した。全筋体積に対する赤色筋体積の割合は 8~9% とほぼ一定で, クロマグロは早い時期から高速巡航遊泳型の筋肉を獲得することが分かった。赤色筋および白色筋繊維断面積はともに成長に伴い増加し, いずれも 250 mm BL 付近で, それぞれ未成魚とほぼ同水準に達した。

5. 卵期から若魚期までの成長に伴う酸素消費量(M)の変動を調べ, 次の結果を得た。卵期の M は, クッパー胞出現期から心拍開始期にかけて急激に増加し, 孵化直前にはそれまでのおよそ 8 倍に達した。孵化後の魚体重当たり M の変動は 4 相のアロメトリーを呈し, 前期仔魚から後期仔魚への移行期, 脊索末端の屈曲期, および稚魚期にそれぞれ成長屈折点が存在した。 M は魚体重の増加に伴って稚魚期まで高い割合で増加し, 以後, 緩やかに増加した。若魚期における M および致死酸素濃度をブリと比べたところ, 前者で約 3 倍高く, 後者は 1 ml/l 以上も高いことがわかった。

IV. 稚魚期から若魚期にかけて頻発する衝突死による減耗の防除対策に資するため, 遊泳力に関する外部諸器官の发育過程と遊泳行動の変化を調べるとともに, 衝突による骨格の損傷と死亡状況から衝突多発期を調査し, その原因について検討した。

1. 遊泳速度と遊泳推進力に関係の深い尾鰭の形状の変化, 並びに制御能力に関係の深いその他の鰭および尾柄主隆起縁の発達過程を調べ, 次の結果を得た。(1) 推進力に関係の深い尾鰭の形状は, 发育に伴って体長 160 mm までに急速に高速巡航遊泳型を獲得した。その間, 尾鰭振動数が減少するにもかかわらず遊泳速度は速くなり, 尾鰭の発達経緯と一致した。また, 突進速度が既往の他魚種のそれに比べて 2~3 倍速いことを明らかにした。(2) これに対し, 揚力獲得に重要な尾柄主隆起縁は 70~100 mm BL で発現し, 200 mm BL までに急速に発達した。また, 遊泳制御能力に関係の深い他の鰭, 特に, 胸鰭および腹鰭は, 160 mm BL でも発達途上にあり, 各測定部位の体長に対する割合が, 成魚のそれに等しくなるのは 200~250 mm BL であることが分かった。すなわち, 稚魚期から若魚期のクロマグロの遊泳能力は, 高い推進力を獲得しながらも, 制御能力が未発達な時期であることを明らかにした。

2. 30~120 日齢までの減耗状況を調べ, 次の結果を得た。クロマグロは僅かな環境変化に対して驚愕反応, すなわち, 突進遊泳を行い, 水槽壁に衝突するのが頻繁に観察され, 多くの死亡魚の脊柱と副蝶形骨に損傷を認めたことから, 衝突が直接または間接的死因であることを認めた。この現象の頻発期間は 30 日齢(50 mm BL)頃から, 60 日齢(300 mm BL)までで, 稚魚期から若魚期に相当することが分かった。この時期に突進遊泳-衝突が多発する原因の 1 つは, 前節および第 III 章で明らかにした发育過程から総括し, 遊泳制御能力の未発達な時期にみられるクロ

マグロ特有の現象によるものと推察した。

V. クロマグロ種苗の量産実験結果から、現状での生産過程を集約的に示し、各飼育過程で用いる水槽、用水、並びに環境、餌料系列および疾病などについて検討を加えた。大きな減耗期は、10日齢頃までの初期、以後、稚魚前期にかけての共喰い、および稚魚期から若魚期にかけての突進遊泳による衝突死の3段階にわたって存在することが明らかになった。

30～40日齢（40～70 mm BL）の沖出し時期から始まり、クロマグロの大量種苗生産を阻んでいた第3減耗期の衝突死は、突進遊泳の起点から、その持続距離もしくは衝突回避体勢を得る地点までの距離内に水槽壁あるいは生簀網が存在することにあると考えた。その最大の原因が、第Ⅲ章および第Ⅳ章で明らかにしたように、遊泳制御能力が未発達な発育段階であることによると推察したことから、クロマグロ種苗量産化のための沖出し用網生簀の大きさは、衝突頻度低減のために直径30m以上が必要であることを明らかにした。

本研究で生産したクロマグロ種苗を用いてその育成を図ったところ、網生簀のサイズを大きくするに従って生残率は高くなり、2000年6月現在、1995年産、9尾（50～90 kg）；1996年産、19尾（25～60 kg）；1998年産、400尾（10～25 kg）をそれぞれ生存させることに成功した。これらのクロマグロは親魚養成に向けて飼育を継続しており、1995年産は串本周辺海域における成熟年齢である満5歳に達した。本研究によって、クロマグロに特有で重大な第3減耗期の衝突死の原因の一つを明らかにし、その対策によって、人工種苗からの養殖および親魚養成の可能性を実証した。

Studies on the Seedling Production of the Pacific Bluefin Tuna,
Thunnus thynnus orientalis

Shigeru Miyashita

Summary

The Pacific bluefin tuna, *Thunnus thynnus orientalis*, is one of the most important species in fisheries industry. There is a growing awareness of the need to preserve this natural resource. Seedling production is required to reinforce the natural resource and for aquaculture. However, there is little information on its aquaculture compared to its biological characteristics especially in terms of stock assessment. This is because the Pacific bluefin tuna grows to a very large size, undergoes transoceanic migration, and is hard to handle, because their skin is easily injured. Therefore, there has been no report of the use of artificial seedlings for the aquaculture of this species until now.

For the establishment of mass seedling production techniques, it is necessary to develop breeding and rearing technologies on the basis of information on development during the early life stages. In this study, information is collected which is required for seedling production, such as the spawning behavior of reared fish, embryonic development, development of internal and external morphology during larval and juvenile stages, and the relationship between swimming performance and the reduction period. In addition, an attempt was made to make the tuna seedling production practicable and the technology of larviculture was developed.

I. Young Pacific bluefin tuna wild-caught in 1987 were raised to adulthood. After 1992, the following were examined; seasonal change of the gonad-somatic index, natural spawning, condition of the gonads, and structure of egg membrane and spermatozoon. (1) Spawning among Pacific bluefin tuna occurred for 2 months from mid June to mid August in Kushimoto. (2) The water temperature ranged 21.6~29.2°C during this period of natural spawning. (3) The size composition of eggs in the ovary of the ripe female was multimodal, and thus it was concluded that the Pacific bluefin tuna spawn more than once in a season. (4) The spermatozoa was about 35 μ m in overall length, and was composed of a head, middle piece and tail which is common in teleosts. (5) Eggs are transparent and colorless, spherical, pelagic, and 0.926~1.015 mm in diameter. The egg diameter decreased the greater the water temperature at spawning.

II. Biological and biochemical changes during embryonic development; a basis for egg management.

1. Embryonic development, the speed of development, the time from spawning to hatching, and hatchability were examined in relation to water temperature. The embryonic development differed little from that of other teleosts. Larvae hatched at 24°C 32 hours after spawning. The temperature range (the eclosion limitative water temperature) for normal hatchability of over 50% was 21.2~29.8°C. Thus, the optimum eclosion temperature for Pacific bluefin tuna is supposed to be 25°C. This was supported by the fact that at that temperature, the normal hatchability was highest and the abnormal larval birth rate was lowest.

2. Changes in the biochemistry and enzymatic activity of the egg during development was examined. We observed no change in moisture, total nitrogen and phospholipid contents of the egg during development. The free amino acid content slightly decreased during the development, whereas, in contrast, the protein content gradually increased. The level of triglyceride (TG) which is the main constituent at the early stage of cleavage, rapidly decreased after the late gastrula stage to one third of that at the start of the development. This means that the main source of energy during embryonic development was TG. Activity changes of aspartate aminotransferase, alanine aminotransferase, creatine kinase, lactate dehydrogenase, and alkaline phosphatase suggest that the organogenesis occurs around the time Kupffer's vesicle appears.

III. Development of external morphology and lateral muscle, formation of digestive organs, and change in enzymatic activity and oxygen consumption in the reared larvae and juveniles.

1. Development of the external morphology from larval to juvenile stage was examined. Fish, 2.83 mm in body length (BL) just after hatching, grew to be 10.62 mm at 20-d posthatch. The growth was accelerated from 20-d posthatch. By approximately 4 mm BL, larvae had developed melanophore patterns peculiar to preflexion larvae. Erythrophores, whose pattern is useful for the identification of tuna species, first appeared in the caudal area at 4.63 mm BL. Thereafter, they appeared on the caudal fin membrane, lower jaw, and hypural plate. All erythrophores had disappeared by 19.72 mm BL. The jaw tooth appeared at 5~6 mm BL. Spines of the head were fully developed by 7 mm BL, and had disappeared by 38 mm BL. The flexion stage was from 6~8 mm BL. The adult complement of fin rays was attained at 10 mm BL and at this size the fish showed the melanophore pattern of a juvenile, although it was not complete. Scales appeared at 27 mm BL.

The allometry of body parts in relation to BL was multiphased with 3-4 growth inflection points, and growth inflection points were concentrated at the transitional stage from prelarva to post larva, at the flexion stage, and at the transitional stage from larva to juvenile. At these stages, remarkable changes occurred both ecologically and physiologically.

2. Development of the external morphology from juvenile to young stage was examined. Fish grew faster after the juvenile stage than other species reared, reaching 32.5 mm in BL at 29-d posthatch, and 140 mm at 50-d posthatch. Thus, the fish are thought to grow to a size of 200-300 mm BL over two months at which time they are captured off Kushimoto. In the allometry of body parts in relation to BL, the growth in flection points are concentrated at 80~100 mm BL. Thereafter, the ratios of body parts except for eye diameter, body height, and caudal peduncle depth reached constant values which are the same as those of adult fish. At this stage, the small finlets became independent which is characteristic of scombrids and the caudal keel appeared. In addition, there was a large change in swimming behavior. From these results, it is concluded that the transition from juvenile to young occurs at 80~100 mm BL. Reduction due to trauma caused by collision increased at this period which is peculiar to the Pacific bluefin tuna. At 200 mm BL, the ratio of caudal peduncle depth to BL reached that of adult, and this was considered the transitional stage from young to immature fish.

3. Development of digestive organ was examined from hatch out to juvenile stage. Liver,

gallbladder, and pancreas had formed by 36-h posthatch, and the activity of trypsin-like enzyme and amylase increased from the commencement of feeding. The rotation of the intestine had finished by the flexion stage (around 10-d posthatch), and pharyngeal teeth and mucilage cells of the gullet were differentiated. The gastric caecum, gastric gland, and pyloric caeca began to form. The activity of pepsin-like enzyme increased with the formation of the gastric gland, and the function and pyloric caeca of the stomach developed remarkably during the transitional stage from postflexion to juvenile (17~25-d posthatch). The ratio of preanal length in relation to BL, which was constant until 11-d posthatch, increased by 26-d posthatch. These results suggest that the development of the digestive system of the Pacific bluefin tuna is mainly qualitative until the flexion stage and quantitative thereafter.

4. Development of lateral muscles which generate motive force was determined from juvenile to young stage. Volumes of blood muscle (red muscle) and ordinary muscle (white muscle) increased exponentially with the growth. Both muscles had a growth inflection point at 80 mm BL and growth was accelerated thereafter. The volume ratio of red muscle to whole muscle was constant (8-9%) and this suggested that the Pacific bluefin tuna has muscles suitable for high speed cruising from an early stage. Both the cross sectional areas of red and white muscle fibers increased with growth. These areas reached the same ones as immature fish at 150 mm BL for the former and at 250 mm BL for the latter.

5. The change in oxygen consumption (M) with growth from the egg stage to the young stage was examined. M during the egg stage rapidly increased eight-fold from heartbeat onset to the stage of the appearance of Kupffer's vesicle. The change of M after the hatching in relation to body weight showed allometry with 4 different phases, and a inflection point existed at the transitional stage from prelarval to postlarval stage, flexion stage, and juvenile stage. M increased at high ratio in the juvenile stage, and gradually increased from the juvenile to the young stage. M at the young stage was three times higher than in yellow tail, *Seriola quinqueradiata*, and the lethal oxygen concentration was 3 ml/l higher than in yellow tail at the same stage.

IV. For the prevention of the large reduction from juvenile to young stage, at which time the fish die due to trauma caused by collision, the period of frequent collisions was identified by examining the injuries in bones and the daily reduction number. In addition, the mechanism of this reduction was investigated by examining the development of the external morphology concerning swimming performance and the change of swimming behavior.

1. External morphology concerned with swimming performance, the shape of the caudal fin, which generates the motive power, and the development of pectoral, pelvic, dorsal and anal fins, and a caudal keel, which are related to swimming control. The change in swimming speed with growth was also examined. (1) The shape of the caudal fin, which is related closely to the propulsion power, changed remarkably to be suitable for high-speed swimming by 160 mm BL. The swimming speed increased during this period in spite of a decrease of beat frequency of the caudal fin. This suggests greater efficiency in swimming during this period. Estimated burst swimming speed was 2~3 times that of other species reported. (2) The primary caudal keel, which generates the lifting

force, appeared at 70-100 mm BL and had developed remarkably by 200 mm BL. In addition, fins related to the control of swimming, especially pectoral and pelvic fins, were still developing at around 160 mm BL and the ratios of measurements of fins were the same as in adult fish at 200-250 mm BL. This means that the Pacific bluefin tuna attain remarkable propulsion power at the juvenile to young stage, but their control system for swimming develops later.

2. From 30 to 120-d posthatch, we observed and kept a record of the reduction due to trauma caused by collision and examined the bone injuries which are a direct cause of the reduction. The Pacific bluefin tuna were startled by subtle changes in the environment, such as variation in light and noise intensity, and reacted with a burst of swimming and collided with the tank wall. The daily growth rate increased from 30-d posthatch (50 mm BL) and remained at more than 4% until 60-d posthatch (300 mm BL). This period corresponds to the development from juvenile to young.

From these results and the results discussed in the third chapter, we conclude that one of the reasons for the frequent occurrence of collisions from the juvenile to young stage was the remarkable increase of propulsion power which precedes the development of organs used to control swimming.

V. From the results of the mass-production experiment of the Pacific bluefin tuna, the most suitable process and the techniques for each process, the shape and volume of the rearing tank, water quality, environmental conditions, feeding scheme, and diseases were discussed. There were three periods of reduction in early life, that is, from hatching to 10-d posthatch, from 10-d posthatch (6~7 mm BL) to the juvenile stage (cannibalism), and from the juvenile to young stage (reduction due to trauma caused by collisions).

Transfer to the open sea net cage from the indoor rearing tank should be done on 30~40-d posthatch, 40~70 mm BL. The reduction due to trauma by collision, the third largest reduction, which starts in this period, is supposed to be caused by bursts of swimming and an inability to avoid the tank or net wall. The underdevelopment of the ability to control swimming induces collisions at this stage, thus a space large enough to prevent collisions is necessary for the rearing of tuna during this period. Therefore, the net cage for intervening culture should be at least 30 m in diameter.

Survival in the rearing experiment using artificially hatched Pacific bluefin tuna increased with the enlargement of the net cage. The survival number is nine for the 1995 class (50-90 kg in body weight), nineteen for the 1996 class (25-60 kg in body weight), and four hundred for the 1998 year (10-25 kg in body weight). The rearing of these fish is to be continued for the growout of the broodstock, and the 1995 fish have reached the mature age of five years.

In this study, the possibility of aquaculture and growout of broodstock from artificially hatched seedlings was demonstrated mainly by elucidating the cause of the third reduction period and taking measures to prevent the reduction.

謝 辞

養成クロマグロの産卵と人工孵化の研究を当初から指導され、完全養殖の夢を追いながら志半ばで逝去された近畿大学水産研究所前所長 故原田輝雄先生に本論文を捧げます。

本研究の端緒を与えて下さり、御懇篤な御指導、御鞭撻を賜った近畿大学水産研究所所長・教授 熊井英水先生に衷心より深く感謝の意を表します。なお、終始御懇切なる御指導と本論文の御校閲を賜った京都大学名誉教授・前近畿大学農学部水産研究所特任教授 池田静徳先生に謹んで深謝申し上げます。さらに、近畿大学農学部教授 平田八郎先生ならびに上野紘一先生には、終始貴重な御助言と御指導を賜りました。ここに心から厚く御礼申し上げます。

本研究は近畿大学水産研究所の一大プロジェクトとして遂行された。その間、研究を推進するにあたり、村田 修教授を始め、滝井健二助教授、澤田好史、久保喜計、石橋泰典、田中祐志(現、東京水産大学海洋生産学科助教授)各講師、家戸敬太郎、瀬岡 学両助手、並びに服部亘宏研究員に多大の御協力をいただいたことを特記して、謝意を表します。また、卵発生については京都大学名誉教授・前近畿大学生物理工学部教授岩井 保先生に、仔稚魚の発育については京都大学助教授中村 泉先生並びに高知大学教授木下 泉先生に、消化酵素活性の測定については神戸女学院大学教授川合真一郎先生に、それぞれ貴重な御意見をいただいた。ここに心から厚く御礼申し上げます。

また、親魚養成生簀の設置や幼魚の採捕にあたって、格別の御協力をいただいた大島、須江、および三輪崎の各漁業協同組合の皆様には感謝します。そして、給餌、生簀網交換などの親魚養成管理、熟度調査および卵採集、仔稚魚飼育および中間育成など、一連の作業に長年に亘って多大な労をいただいた近畿大学水産研究所大島分室の岡田貴彦、戸瀬憲一、向井良夫(現奄美実験場)、倉田道雄、田村利博および中谷正宏各技術員を始め、多くの従業員・学生諸氏に厚く御礼申し上げます。

さらに、本研究における一連の実験実施にあたり、惜しめない御協力をいただいた本学水産研究所の白浜、浦神、すさみ、富山、奄美各実験場、および種苗センター白浜事業場の従業員ならびに学生諸氏に厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが、施設および要員を始めとして、永年に亘る大規模な実験実施を許可・支援していただいた大学当局に深謝します。

文 献

- 1) Collette, B. B. and C. E. Nauen (1983): An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos, and related species known to date. FAO species catalogue, vol. 2. Scombrids of the world, *FAO Fish. Synop.*, 125 (2), 1-137.
- 2) 岩井 保・中村 泉・松原喜代松 (1965): マグロ類の分類学的研究. 京都大学みさき臨海研究所特別報告, 2, 1-51.
- 3) 中村 泉 (1994): マグロ類の分類. 海洋, 26 (9), 521-528.
- 4) 澤田好史・熊井英水 (2000): クロマグロ. 海水魚の養殖(熊井英水編) 湊文社, 東京,

pp.212-216.

- 5) 平山信夫 (1998) : マグロ漁業資源とその漁具・漁法. マグロの生産から消費まで (小野征一郎編), 成山堂書店, 東京, pp.107-141.
- 6) 藤田 清 (1998) : マグロの種類と生態. マグロの生産と消費 (小野征一郎編著), 成山堂書店, 東京, pp. 1-48.
- 7) 田中 克・落合 明 (1986) : 新版魚類学 (下), 恒星社厚生閣, 東京, p.885.
- 8) 阿部宗明 (1987) : 原色魚類大図鑑, 北隆館, 東京, p.889.
- 9) Gibbs, R. H. and B. B. Collette. (1967): Comparative anatomy and systematics of the tunas, genus *Thunnus*. *Fish. Bull., U. S.*, 66, 65-130.
- 10) Chow, S. and S. Inoue (1993): Intra- and interspecific restriction fragment length polymorphism in mitochondrial genes of *Thunnus* tuna species. *Bull. Nat. Res. Inst. Far. Seas Fish.*, 30, 207-225.
- 11) Collette, B.B. (1999): Mackerels, molecules, and morphology. *Soc. Fr. Ichtyol.*, 25, 149-164.
- 12) Orange, C. J. and B. D. Fink (1963): Migration of a tagged bluefin tuna across the Pacific Ocean. *Calif. Fish and Game*, 49, 307-308.
- 13) 現代おさかな辞典 (阿部宗明・本間昭郎監修) (1997), 株式会社エヌ・ティー・エス, 東京, pp.615-619.
- 14) 吉川明夫・本間敬二 (1980) : カナダマグロの蓄養. ていち, 57 (59), 1-12.
- 15) 乗田孝雄 (1999) : スペインのクロマグロ蓄養事業. アクアネット, 2 (9), 28-32.
- 16) 百野亜津子 (1999) : 南オーストラリアのミナミマグロ蓄養事業. アクアネット, 2 (9), 22-27.
- 17) 須田 明 (1995) : クロマグロ類の栽培漁業技術開発. さいばい, 76, 14-23.
- 18) 本間昭郎 (1995) : クロマグロ増養殖技術開発への取り組みとその周辺. さいばい, 76, 9-13.
- 19) 原田輝雄・熊井英水・水野兼八郎・村田 修・中村元二・宮下 盛・古谷秀樹 (1971) : クロマグロ幼魚の飼育について. 近畿大農紀要, 4, 153-156.
- 20) 原田輝雄・熊井英水・中村元二 (1973) : 金網いけすによるクロマグロおよびハガツオの飼育. 近畿大農紀要, 6, 117-122.
- 21) 上柳昭治・森慶一郎・西川康夫・須田 明編集 (1973) : マグロ類養殖技術開発試験報告ー1970年4月～1973年3月. 遠洋水研業績, 105, 1-165.
- 22) 原田輝雄・熊井英水・岡本 茂 (1976) : クロマグロおよびハガツオの3年飼育. 近畿大農紀要, 9, 21-31.
- 23) 山口光明 (1986) : クロマグロ. 浅海養殖 (資源協会編著), 大成出版, 東京, pp.335-355.
- 24) 原田輝雄・水野兼八郎・村田 修・宮下 盛・古谷秀樹 (1971) : キハダの人工ふ化と仔魚飼育について. 近畿大農紀要, 4, 145-151.
- 25) 森慶一郎・上柳昭治・西川康夫 (1971) : キハダの人工ふ化・飼育における仔魚の形態変化. 遠洋水研報, 5, 219-232.
- 26) 原田輝雄・村田 修・古谷秀樹 (1973) : マルソウダの人工ふ化と仔魚飼育について. 近畿大農紀要, 6, 113-116.

- 27) 原田輝雄・村田 修・宮下 盛 (1973): ヒラソウダの人工ふ化と仔魚飼育について. 近畿大農紀要, 6, 109-112.
- 28) 原田輝雄・村田 修・宮下 盛 (1973): ハガツオの人工ふ化・仔稚魚の飼育. 昭和 48 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.65.
- 29) 原田輝雄・熊井英水・村田修・中村元二・岡本茂・乗田孝雄 (1979): クロマグロの人工種苗生産の研究-I 養成クロマグロの成熟と産卵. 昭和 54 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.85.
- 30) 原田輝雄・村田 修・乗田孝雄 (1983): 数種の餌料によるクロマグロ幼魚の飼育. 近畿大農紀要, 16, 59-65.
- 31) 原田輝雄・熊井英水・村田 修・宮下 盛・菅家俊一 (1979): クロマグロの人工種苗生産の研究-V 卵発生と仔稚魚の成長に伴う形態の変化. 昭和 54 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.87.
- 32) 木原 稔・椎名康彦・木村省二・尾形 茂・川野儀顕・桐生耕造 (1993): 養殖クロマグロ研究-III 産卵と卵発生. 平成 5 年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.165.
- 33) 遠藤文則 (1995): クロマグロ種苗生産における現状-総説-. 水産増殖, 43 (2), 263-267.
- 34) 椎名康彦・木原 稔・渥美雅也・木村省二・尾形 茂・川野儀顕・桐生耕造 (1993): 養殖クロマグロ研究-IV 仔稚魚の成長に伴う形態変化. 平成 5 年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.165.
- 35) Kaji, T., M. Tanaka, Y. Takahashi, M. Oka, and N. Ishibashi (1996): Preliminary observations on the development of Pacific bluefin tuna *Thunnus thynnus* (Scombridae) larvae reared in the laboratory, with special reference to the digestive system. *Mar. Freshwater Res.*, 47, 261-269.
- 36) Lee C. L. and Fisheries Western Australia (1998): A study on the feasibility of the aquaculture of the southern bluefin tuna, *Thunnus maccoyii*, in Australia. Department of Agriculture Fisheries and Forestry Australia. Canberra, Australia. 92p.
- 37) 熊井英水 (1995): クロマグロ増養殖の来歴と現状. さいばい, 76, 43-47.
- 38) 熊井英水 (1998): クロマグロの人工ふ化飼育とその再生産に関する研究-総説-. 日水誌, 64 (4), 601-605.
- 39) 岩井 保 (1991): 魚学概論. 恒星社厚生閣, 東京, pp.151-153.
- 40) 内田恵太郎・道津喜衛 (1958): 対馬暖流開発調査報告 (水産庁編), 2, 3-60.
- 41) 渡部泰輔・服部茂昌 (1971): 魚類の発育段階の形態的区分とそれらの生態的特徴. さかな, 7, 54-59.
- 42) 松原喜代松・落合 明・岩井 保 (1979): 新版 魚類学 (上), 恒星社厚生閣, 東京, pp.1-375.
- 43) 宮下 盛・村田 修・澤田好史・岡田貴彦・久保喜計・石谷 大・瀬岡 学・熊井英水 (2000): 養成クロマグロの成熟と産卵. 水産増殖, 48 (3), 475-488.
- 44) 原田輝雄, 熊井英水, 村田修, 中村元二, 岡本茂, 乗田孝雄 (1979): クロマグロの人工種苗生産の研究-I 養成クロマグロの成熟と産卵. 昭和 54 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.85.
- 45) 平田 博, 遠藤文則, 小林 忠, 永井康豊, 嶺 稔 (1995): 小型生簀における養成クロマ

グロの成熟と産卵について. 平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.60.

- 46) Rivas, L.R. (1954): A preliminary report on the spawning of the western North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Straits of Florida. *Bull.Mar. Sci. Gulf and Caribbean*, 4 (4), 302-322.
- 47) Tiews, K. (1963): Synopsis of biological data on bluefin tuna *Thunnus thynnus* (Linnaeus) 1758 (Atlantic and Mediterranean). *FAO Fish. rep.*, 6, 422-481.
- 48) Sara, R. (1973): Sulla biologia dei tonni (*Thunnus thynnus* L.) Modelli di migrazione ed osservazioni sui meccanismi di migrazione e di comportamento. *Boll. Pesca Piscic. Idrobiol.*, 28 (2), 217-243.
- 49) Piccinetti, C. (1978): Recent studies on the biology and ecology of tuna in the Mediterranean. The 5th Int. Ocean Dev. Conf. (MS), 10p. Fig. 1.
- 50) Kishinouye, K. (1923): Contribution to the comparative study of the so-called scombroid fishes. *J. Coll. Agri. Imp. Univ. Tokyo*, 8 (3), 295-475.
- 51) 中村廣司 (1938): マグロ *Thunnus orientalis* (Schlegel)の習性に就て (予報). 動雑, 50 (5), 279-281.
- 52) 中村廣司 (1949): マグロ類とその漁業, 竹内書房, 118p., Figs. 1-29.
- 53) Yamanaka, H. and staff of the Nankai Regional Fisheries Research Laboratory (1963): Synopsis of biological data on Kuromaguro *Thunnus orientalis* (Tomminck and Schlegel), 1842 (Pacific Ocean). *FAO Fish. Rep.*, 6 (2), 180-217.
- 54) 矢部 博・上柳昭治・渡辺久也 (1966): クロマグロの初期生態及びミナミマグロの仔魚について. 南水研報, 23, 95-129.
- 55) 上柳昭治 (1967): マグロ類の産卵場について. 鮪漁業, 60, 15-20.
- 56) 上柳昭治 (1969): インド・太平洋におけるマグロ類仔稚魚の分布ービンナガ産卵域の推定を中心とした検討ー. 遠洋水研報, 2, 177-256.
- 57) 沖山宗雄 (1974): 日本海におけるクロマグロの後期仔魚の出現. 日水研報, 25, 89-97.
- 58) 依田 孝 (1981): 道西日本海のクロマグロ卵巣の成熟状態について. 北水試月報, 38 (7), 211-221.
- 59) 西川康夫 (1986): 1984, 1985年8月, 日本海におけるクロマグロ仔魚の出現について. 水産海洋研究会報, 50 (2), 186-187.
- 60) 西川康夫 (1990): クロマグロの主要産卵場. 水産技術と経営, 36 (11), 13-21.
- 61) 熊井英水・村田 修・岡本 茂・向井良夫・中谷正宏・宮下 盛・*原田 輝雄 (1995): 串本大島海域におけるクロマグロの養成と産卵. 平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.60.
- 62) 村田 修・石谷 大・宮下 盛・瀬岡 学・久保喜計・熊井英水 (1995): 養成クロマグロの産卵期における生殖腺の性状. 平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.61.
- 63) 熊井英水 (1998): マグロ類の増養殖の現状と将来. マグロの生産から消費まで (小野征一郎編著), 成山堂書店, 東京, pp.50-65.
- 64) 升間主計・岡 雅一・兼松正衛・手塚信弘・照屋和久・伏見 浩・石橋矩久 (1991): 八重山における養成クロマグロの摂餌と成長. 栽培技研, 20 (1), 35-40.

- 65) 升間主計 (1995): マグロ類種苗生産技術の近況. 水産技術と経営, 41 (10), 48-62.
- 66) 落合 明・田中 克 (1986): 魚類学 (下). 恒星社厚生閣, 東京, 1889p.
- 67) Farley, Jessica H. and Davis Tim L. O. (1998): Reproduction dynamics of southern bluefin tuna, *Thunnus maccoyii*. *Fish. Bull.*, 96, 223-236.
- 68) 二階堂英城・宮部尚純・上柳昭治 (1991): メバチ *thunnus obesus* の産卵時刻と産卵多回性. 遠洋水研報, 28, 47-65.
- 69) Schaefer, K. M. (1996): Spawning time, frequency, and batch fecundity of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, near Clipperton Atoll in the eastern Pacific Ocean. *Fish. Bull.*, 94, 98-112.
- 70) 中村廣司 (1965): 世界のマグロ資源 I—種類, 分布と回遊, 繁殖と成長. 水産研究叢書 10-1, 日本水産資源保護協会, 東京, pp.37-38.
- 71) 上柳昭治 (1994): マグロ類の産卵, 初期生態. 海洋, 26 (9), 534-538.
- 72) 木川昭二 (1964): インドマグロ (*Thunnus thynnus maccoyii*?) 卵巣の産卵数. 南水研報告, 20, 27-34.
- 73) 熊井英水 (1984): イシダイの養殖生物学的研究. 近大水研報, 2, 1-127.
- 74) 北島 力 (1978): マダイの採卵と稚魚の量産に関する研究. 長崎県水産試験場論文集, 5, 1-92.
- 75) 羽生 功 (1991): 生殖周期. 魚類生理学 (板沢靖男・羽生 功編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.287-325.
- 76) 岩井寿夫・柏木正章 (1989): 発生と孵化管理. 水族繁殖学 (隆島史夫・羽生 功編), 緑書房, 東京, pp.195-237.
- 77) 宮下 盛・田中祐志・澤田好史・村田 修・服部亘宏・滝井健二・向井良夫・熊井英水 (2000): クロマグロ卵の発生と孵化に及ぼす水温の影響. 水産増殖, 48 (2), 199-207.
- 78) 村井 衛・青木雄二・西村和久 (1985): 小笠原父島におけるシマアジの親魚養成と採卵. 水産増殖, 33 (2), 82-87.
- 79) 山田陽巳 (1999): アーカイバルタグによるクロマグロの移動生態. 遠洋, 104, 2-5.
- 80) 那須 司・外山秀樹・大久保兼清 (1988): 新魚種開発試験—シマアジの種苗生産. 昭和 63 年度宮崎県栽培漁業センター事業報告書, 60-73.
- 81) 福所邦彦 (1979): イシダイの種苗生産に関する基礎的研究. 長崎県水産試験場論文集, 6, 1-173.
- 82) 升間主計 (社団法人日本栽培漁業協会奄美事業場) (2000): 私信.
- 83) 荒井 寛 (1999): 飼育と展示の 10 年. どうぶつと動物園, 51 (10) 338-345.
- 84) Ramon, D. and K. Beily (1996): Spawning seasonality of albacore, *Thunnus alalunga*, in the South Pacific Ocean. *Fish. Bull.*, 94, 725-738.
- 85) 山口正男 (1978): タイ養殖の実際. 恒星社厚生閣, 東京, pp.146-150.
- 86) 九州・山口ブロック水産試験場マダイ種苗生産研究会 (1977): マダイ種苗生産技術の現状と問題点. 日本水産資源保護協会, 東京, 19-22.
- 87) 酒井 清・野村 稔・隆島史夫 (1985): マダイ自然産出卵の形状. 日水誌, 51 (9), 1395-1399.
- 88) Matti, X. (1991): Spermatozoon ultrastructure and its systematics implication in fishes. *Can.*

J. Zool., **69**, 3038-3055.

- 89) Jamieson, B. G. M. (1991): Fish evolution and systematics evidence from spermatozoa. Cambridge Univ. Press, 319p.
- 90) Hara, M. and Okiyama (1998): An ultrastructural review of the spermatozoa of Japanese fishes. *Bull. Oce. Res. Ins. Univ. Tokyo*, **33**, 1-138.
- 91) 黒倉 寿 (1992): 精子の凍結保存—魚類. 精子学 (毛利秀雄監, 森沢正昭・星 元紀編), 東京大学出版会, 東京, pp.238-246.
- 92) 鈴木 亮 (1991): 発生生理とバイオテクノロジー. 魚類生理学 (板沢靖男・羽生 功編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.585-609.
- 93) 細川和子・伏見 徹・松里寿彦 (1981): マダイの卵膜表面の電子顕微鏡的観察. 魚類学雑誌, **27** (4), 339-343.
- 94) Yamamoto, M. (1963): Electron microscopy of fish development 11. Oocyte-follicle cell relationship and formation of chorion in *Oryzias latipes*. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, **4** (10), 123-127.
- 95) 原田輝雄・村田 修・宮下 盛・小田誠二・横山達雄・米島久司 (1979): クロマグロの人工種苗生産の研究—II 水温がふ化に及ぼす影響. 昭和 54 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.86.
- 96) 田中義麿・田中 潔 (1993): 科学論文の書き方. 裳華房, 東京, 125p.
- 97) 市原清志 (1995): 回帰係数の差の検定. バイオサイエンスの統計学, 南江堂, 東京, pp. 218-223.
- 98) Padoa, E. (1956): Uova, larve e stadi giovanili di Teleostei; Scombriformes. *Fauna e Flora del Golfo di Napoli, Monogra.*, **38**, 471-507.
- 99) 川崎 健 (1982): 浮魚資源. 恒星社厚生閣, 東京, pp. 141-145.
- 100) 松浦修平・古一克彦・松山倫也 (1988): マダイ 1 尾による毎日産卵の確認とその卵質. 水産増殖, **36** (1), 33-39.
- 101) 瀬岡 学 (1998): マダイの卵発生と卵質改善に関する生化学的研究. 近大水研報, **6**, 103-158.
- 102) 池田知司・水戸 敏 (1988): 卵と孵化仔魚の検索. 日本産稚魚図鑑 (沖山宗雄編), 東海大学出版会, 東京, pp. 999-1081.
- 103) 原田輝雄 (1966): ブリの増殖に関する研究. 近大水研報, **1**, 1-274.
- 104) 升間主計 (1990): カンパチの卵発生と仔稚魚の形態. 魚類学雑誌, **37** (2), 164-169.
- 105) 立原一憲・蛭子亮制・塚島康生 (1993): カンパチの産卵, 卵内発生および仔稚魚の形態変化. 日水誌, **59** (9), 1479-1488.
- 106) 上柳昭治・西川康夫・松岡玳良 (1974): カツオの人工ふ化と仔魚の形態. 遠洋水研報, **10**, 179-188.
- 107) 渡辺泰輔 (1970): マサバの発育初期における形態・生態ならびに資源変動に関する研究. 東海水研報, **62**, 1-255.
- 108) 村井 衛・加藤憲司・中野 卓・隆島史夫 (1987): シマアジの卵発生と仔魚の形態学的変化. 水産増殖, **34** (4), 217-226.

- 109) 藤田矢郎・与賀田稔久 (1984): ヒラマサの成熟促進, 卵内発生と幼稚仔. 魚類学雑誌, 30 (4), 426-434.
- 110) 安武 洋・西 源二郎・森慶一郎 (1973): 船上におけるメバチ, *Thunnus obesus*, の人工授精, 初期飼育および前期仔魚の形態. 遠洋水研報, 8, 71-78.
- 111) 田中祐志 (1990): 浮遊性魚卵・仔魚の比重変化と海況構造に関連した分布・移動. 京都大学学位論文, 72 pp.
- 112) 水戸 敏 (1961): 日本近海に出現する浮遊性魚卵. アカマンボウ目, マトウダイ目, ボラ亜目, サバ亜目, およびイボダイ亜目. 九大農芸誌, 18 (4), 451-466, pls. 39-43.
- 113) 安永義暢 (1975): ヒラメ卵稚仔の発生・生残に及ぼす水温塩分の影響について. 東海水研報, 81, 151-162.
- 114) 川辺勝俊・村井 衛・加藤憲司・隆島史夫 (1991): シマアジ卵発生に及ぼす水温の影響. 水産増殖, 39 (2), 211-216.
- 115) 萱野泰久・尾田 正 (1991): キジハタ卵の発生に及ぼす水温の影響. 水産増殖, 39 (3), 309-313.
- 116) 山本時男 (1943): 魚卵の発生速度と温度. 魚類の発生生理, 養賢堂, 東京, pp. 110-120.
- 117) 北島 力・高屋雅生・塚島康生・荒川敏久 (1991): マハタの卵内発生および飼育による仔稚魚の形態変化. 魚類学雑誌, 38 (1), 47-55.
- 118) 升間主計・手塚信弘・照屋和久 (1993): スジアラの卵発生と仔稚魚の形態. 魚類学雑誌, 40 (3), 333-342.
- 119) 濱本俊策・真鍋三郎・春日 公・野坂克巳 (1986): ヤイトハタ *Epinephelus salmonoides* の水槽内産卵と生活史. 栽培技研, 15 (2), 143-155.
- 120) Oozeki, Y. and R. Hirano (1985): Effects of temperature changes on the development of eggs of the Japanese whiting *Sillago japonica*. *Fisheries Sci.*, 51 (4), 557-571.
- 121) 柏木正章・鄧 亜光・岩井寿夫 (1990): シロギス卵の高温側ふ化限界温度およびその発生に伴う同温度の変化. 水産増殖, 38 (1), 7-11.
- 122) 木下秀明・道津光生 (1989): マダイ卵の高温耐性. 水産増殖, 37 (1), 15-20.
- 123) Takii, K., S. Miyashita, M. Seoka, Y. Tanaka, Y. Kubo, and H. Kumai (1997): Changes in chemical contents and enzyme activities during embryonic development of bluefin tuna. *Fisheries Science*, 63 (6), 1014-1018.
- 124) Ronnestad, I. and H. J. Fyhn (1993): Metabolic aspects of free amino acids in developing marine fish eggs and larvae. *Rev. Fish Sci.*, 1, 239-259.
- 125) Kjorsvik, E., A. M. Jensen, and I. Holmefjord (1990): Egg quality in fishes, in "Advances in Marine Biology" (ed. by J.H.S. Blaxter and A.J. Southward), Academic Press, London, pp. 71-113.
- 126) Kamler, E. (1992): Early Life History of Fish, Chapman & Hall, London, pp. 83-84.
- 127) Devauchelle, N. and D. Coves (1988): The characteristics of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) eggs: description, biochemical composition and hatching performances. *Aquat. Liv. Resour.*, 1, 223-230.
- 128) Evans, R. P., C. C. Parrish, J. A. Brown, and P. J. Davis (1996): Biochemical composition

- of eggs from repeat and first-time spawning captive Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*). *Aquaculture*, 139, 139-149.
- 129) Takii, K., M. Seoka, O. Takaoka, S. Furuta, M. Nakamura, and H. Kumai (1994): Chemical composition, RNA and DNA contents, and alkaline phosphatase activity with growth of striped jack larvae through juveniles. *Fisheries Sci.*, 60, 73-76.
 - 130) Satoh M., R. Yoshinaka, R. Kuroshima, H. Morimoto, and S. Ikeda (1987): Changes in water soluble vitamin contents and transaminase activity of rainbow trout egg during development. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53, 795-799.
 - 131) AOAC (1984): Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 14th edition, Arlington, VA, 1141p.
 - 132) M. Seoka, M., K. Takii, O. Takaoka, M. Nakamura, and H. Kumai (1997): Biochemical phases in embryonic red sea bream development. *Fisheries Sci.*, 63, 122-127.
 - 133) Lowry, O. H., N. J. Rosenbrough, A. L. Farr, and R. J. Randall (1951): Protein measurement with Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 193, 265-275.
 - 134) 岡村 浩・岡本 奨・武藤聡雄 (1981): タンパク質とアミノ酸. 食品栄養実験 (広田 望編), 地球社, 東京, pp. 207-209.
 - 135) Suzuki, M., M. Yamashita, M. Fujita, H. Kikuchi, H. Nakano, and R. Ordonio (1994): Microanalysis of lipid contents of larval fish. *Natl. Res. Inst. Fish. Sci.*, 6, 1-7.
 - 136) Winberg, G. G. and Collaborators (1971): Symbols, units and conversion factors in studies of fresh water productivity, IBP Central Office, London, pp. 1-23.
 - 137) Ronnestad, I., W. M. Koven, A. Tandler, M. Harel, and H.J. Fhyn (1994): Energy metabolism during development of eggs and larvae of gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Mar. Biol.*, 120, 187-196.
 - 138) Bergmeyer, H. U., P. Scheibe, and A. W. Wahlefeld (1978): Optimization of methods for aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase. *Clin. Chem.*, 24, 58-73.
 - 139) Kanai, I. (1993): Tetrazolium salt method, in "General Clinical Inspection 30th Edition" (ed. by M. Kanai), Kanehara Shuppan, Tokyo, pp. 526-527
 - 140) Szasz, G., W. Grubex, and E. Bernt (1976): Creatine kinase in serum-1. Determination of optimum reaction condition. *Clin. Chem.*, 22, 650-656.
 - 141) Bessey, O. A., O. H. Lowry, and M. J. Brock (1946): A method for the rapid determination of alkaline phosphatase with five cubic millimeters of serum. *J. Biol. Chem.*, 164, 321-329.
 - 142) Harter, H. L. (1960): Critical values for Duncan's new multiple range tests. *Biometrics*, 16, 671-685.
 - 143) Ostrowski, A.C. and S. Divakaran (1991): Energy substrates for eggs and prefeeding larvae of the dolphin *Coryphaena hippurus*. *Mar. Biol.*, 109, 149-155.
 - 144) Cetta, C.M. and J.M. Capuzzo (1982): Physical and biochemical aspects of embryonic and larval development of the winter flounder *Pseudopleuronectes americanus*. *Mar. Biol.*, 71, 327-337.
 - 145) Fyhn, H.J. and B. Serigstad (1987): Free amino acids as energy substrate in developing eggs

- and larvae of the cod *Gadus morhua*. *Mar. Biol.*, **96**, 335-341.
- 146) Finn, R.N., H.J. Fyhn, and M.S. Evjen (1991): Respiration and nitrogen metabolism of Atlantic halibut eggs (*Hippoglossus hippoglossus*). *Mar. Biol.*, **108**, 11-19.
 - 147) Kimata, M. (1982): Changes of chemical composition during early development of egg and larva in the half beak *Hemiramphus sajori*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **48**, 1663-1671.
 - 148) Tanaka, Y., Y. Mukai, K. Takii, and H. Kumai (1991): Chemoreception and vertical movement in planktonic yolk-sac larvae of red sea bream *Pagrus major*. *J. Appl. Ichthyol.*, **7**, 129-135.
 - 149) 塩川光一朗 (1989): ツメガエルの分子生物学. 東京大学出版会, 東京, pp. 34-37.
 - 150) Urich, K. (1994): Comparative Animal Biochemistry, Springer-Verlag, New York, pp.401-684.
 - 151) 隆島史夫 (1997): 水属育成論. 成山堂書店, 東京, pp.1-236.
 - 152) Matsumoto, W. M., E. H. Ahlstorm, S. Jones, W. L. Klawe, Richards, W. J., and S. Ueyanagi (1972): On the clarification of larval tuna identification particularly in the genus *Thunnus*. *Fish. Bull.*, **70**, 1-12.
 - 153) Richards, W. J. and T. Potthoff (1974): Analysis of the taxonomic characters of young scombrid fishes, genus *Thunnus*. In Blaxter, J. H. S., ed.: The early life history of fish, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp.623-648.
 - 154) Kohno, H., T. Hoshino, F. Yasuda, and Y. Taki (1982): Larval melanophore patterns of *Thunnus alalunga* and *T. thynnus* from the Mediterranean. *Japan. J. Ichthyol.*, **28**, 461-465.
 - 155) Miyashita, S., K. Kato, Y. Sawada, O. Murata, Y. Ishitami, K. Shimizu, S. Yamamoto, and H. Kumai (1998): Development of digestive system and digestive enzyme activities of larval and juvenile bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, reared in the laboratory. *Suisanzoshoku*, **46** (1), 111-120.
 - 156) Miyashita S., Y. Sawada, T. Okada, O. Murata, and H. Kumai (2001): Morphological development and growth of laboratory-reared larval and juvenile *Thunnus thynnus* (Pisces: Scombridae). *Fish. Bull.*, **99** (4), 601-616.
 - 157) 落合 明 (1970): 成長. 魚類生理学 (川本信之編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.216-244.
 - 158) Collette, B. B., T. Potthoff, W. J. Richards, S. Ueyanagi, J. L. Russo, and Y. Nishikawa (1984): Scombroidei: Development and Relationships. Pages 591-620 in H. G. Moser, W. J. Richards, D. M. Cohen, M. P. Fahay, A. W. Kendall, Jr. and S. L. Richardson, eds. Ontogeny and systematics of fishes. *Am. Soc. Ichthyol. Herpetol.*, Spec. Publ., No. 1.
 - 159) 上柳昭治 (1966): マグロ類仔魚の赤色素胞とその仔魚同定上の効用について. 南水研報, **24**, 41-48.
 - 160) Collette, B.B. and C.E. Nauen (1983): Scombrids of the world. An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos, and related species known to date. *FAO Fish. synop.*, **125** (2), 1-137.
 - 161) 代田昭彦 (1970): 魚類稚仔期の口径に関する研究. 日水誌, **36**, 353-368.
 - 162) Richards, W. J. and G. R. Dove (1971): Internal development of young tunas of the genera *Katsuwonus*, *Euthynnus*, *Auxis*, and *Thunnus*. *Copeia*, **1**, 72-78.

- 163) Kohno, H., M. Shimizu, and Y. Nose (1984): Morphological aspects of the development of swimming and feeding functions in larval *Scomber japonicus*. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 50 (7), 1125-1137.
- 164) Kohno, H., Y. Taki, Y. Ogasawara, Y. Shirojo, M. Taketomi, and M. Inoue (1983): Development of swimming and feeding functions in larval, *Pagrus major*. *Japan. J. Ichthyol.*, 30 (1), 47-60.
- 165) Kohno, H., R. Ordonio-Aguilar, A. Ohno, and Y. Taki (1996): Osteological development of the feeding apparatus in early stage larvae of the seabass, *Lates calcarifer*. *Ichthyol. Res.*, 43 (1), 1-9.
- 166) Fukuhara, O., T. Nakagawa, and T. Fukunaga (1986): Larval and juvenile development of yellowtail reared in the laboratory. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 52 (12), 2091-2098.
- 167) Sawada, Y., K. Kato, T. Okada, M. Kurata, Y. Mukai, S. Miyashita, O. Murata, and H. Kumai (1999): Growth and morphological development of larval and juvenile *Epinephelus bruneus* (Perciformes: Serranidae). *Ichthyological Research*, 46, 245-257.
- 168) Fukuhara, O. and T. Fushimi (1988): Fin differentiation and squamation of artificially reared grouper, *Epinephelus akaara*. *Aquaculture*, 69, 379-386.
- 169) 川辺勝俊・中野 卓・村井 衛・隆島史夫 (1992): 人工採苗シマアジ仔稚魚の相対成長. 水産増殖, 40 (3), 253-114.
- 170) 木村清志 (1987): イサキの資源生物学的研究. 三重大水産研報, 14, 113-235.
- 171) 隆島史夫・杉山千洋・鳥羽正美・石井重夫 (1982): 人工採苗アユの相対成長. 水産増殖, 30 (2), 88-98.
- 172) 西川康夫 (1985): 黒色素胞の分布型によるマグロ属3種の識別. 遠洋水研報, 22, 119-130.
- 173) Fukuhara, O. and K. Kuniyuki (1978): Morphological development in the wild larvae of Madai, *Chrysophrys major*, as compared to that in the laboratory-reared larvae. *Bull. Nansei Reg. Fish. Res. Lab.*, 11, 19-25.
- 174) Kinoshita, I. (1986): Postlarve and juveniles of silver sea bream, *Sparus asrba* occurring in the surf zones of Tosa Bay, Japan. *Japan. J. ichthyol.* 33, 7-30.
- 175) Kimura, S. and M. Aritaki (1985): Studies on rearing and development of larval and juvenile threeline grunt (Pisces: Haemulidae). *Bull. Fac. Fish. Mie Univ.*, 12, 193-205.
- 176) Kinoshita, I. and S. Fujita (1988): Larvae and juvenile of blue drum, *Nibea mitsukurii*, occurring in the surf zones of Tosa Bay, Japan. *Japan. J. Ichthyol.*, 35, 25-30.
- 177) 魚谷逸郎・斉藤 勉・平沼勝男・西川康夫 (1990): 北太平洋産クロマグロ *Thunnus thynnus* 仔魚の食性. 日水誌, 56 (5), 713-717.
- 178) Støttrup, J. G., K. Richardson, E. Kirkegaard, and N. J. Pihl (1986): The cultivation of *Acartia tonsa* Dana for use as a live food source for marine fish larvae. *Aquaculture*, 52, 87-96.
- 179) Ohno, A. and Y. Okamura (1988): Propagation of the calanoid, *Acartia tsuensis*, in outdoor tanks. *Aquaculture*, 70, 39-51.
- 180) 宮下 盛・澤田好史・小田誠二・中務 寛・村田 修・熊井英水 (1996): 人工孵化クロマ

グロの稚魚期から若魚期における相対成長. 平成8年度日本水産学会春期大会講演要旨集, p.115.

- 181) 中村 泉 (1993): 鰭. 海洋と生物, 14 (1), 6-11.
- 182) 中村 泉 (1993): 尾柄隆起縁. 海洋と生物, 15 (5), 303-310.
- 183) 宮下 盛 (2000): ブリ・ハマチ. 最新海産魚の養殖 (熊井英水編), 湊文社, 東京, pp. 52-77.
- 184) Kaji, T., M. Tanaka, Y. Takahashi, M. Oka, and N. Ishibashi (1996): Preliminary observations on development of Pacific bluefin tuna *Thunnus* (Scombridae) larvae reared in the laboratory, with special reference to the digestive system. *Mar. Freshwater Res.*, 47, 261-269.
- 185) Kawai, S. and S. Ikeda (1973): Studies on digestive enzymes of fishes-III. Development of the digestive enzymes of rainbow trout after hatching and the effect of dietary changes on the activities of digestive enzymes in the juvenile stage. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 39 (7), 819-823.
- 186) Kawai, S. and S. Ikeda (1973): Studies on digestive enzymes of fishes-IV. Development of the digestive enzymes of carp and black sea bream after hatching. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 39 (8), 877-881.
- 187) Miyazaki, T., Y. Fujimaki, and K. Hatai (1986): A light and electron microscopic study on epitheliocystis disease in cultured fishes. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 52 (2), 199-202.
- 188) 江草周三・宮崎照雄・塩満捷夫・藤田征作 (1987): 種苗生産過程でみられたイシガキダイ仔魚のエピテリオシスチス類症. 魚病研究, 22 (1), 33-34.
- 189) Boulhic, M. and J. Gabaudan (1992): Histological study of the organogenesis of the digestive system and swim bladder of the Dover sole, *Solea solea* (Linnaeus 1758). *Aquaculture*, 102, 373-396.
- 190) 安永義暢 (1972): ヒラメ稚仔消化器官の発達について. 東海水研報, 69, 75-89.
- 191) Senger, H., V. Storch, M. Reinecke, and W. Kloas (1994): The development of functional digestive and metabolic organs in turbot, *Scophthalmus maximus*. *Mar. Biol.*, 119, 471-486.
- 192) Tanaka, M. (1973): Studies on the structure and function of the digestive system of teleost larvae. Ph. D. Thesis, Kyoto University, Kyoto. pp. 1-82.
- 193) 榎田 晋・落合 明 (1973): 仔稚魚期におけるブリの消化管の構造と機能の発達について. 日水誌, 39 (9), 923-930.
- 194) Oozeki, Y., P. Hwang, and R. Hirano (1992): Larval development of the Japanese whiting, *Sillago japonica*. *Japanese J. Ichthyol.*, 39 (1), 59-66.
- 195) Ferraris, R. P., J. D. Tan, and M. C. De la Cruz (1987): Development of the digestive tract of milkfish, *Chanos chanos* (Forsskal): Histology and Histochemistry. *Aquaculture*, 61, 241-257.
- 196) Watanabe, Y. and N. Sawada (1985): Larval development of digestive organs and intestinal absorptive functions in the freshwater goby *Chaenogobius annularis*. *Bull. Tohoku. Reg. Fish. Res. Lab.*, 47, 1-10.
- 197) 西川康夫 (1975): カツオ仔稚魚の胃盲囊の発達と摂餌状況. 遠洋水研報, 12, 221-236.

- 198) 中村陽子・田中 克・青海忠久(1992)：サワラの仔稚魚期における消化系の発達. 平成4年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.201.
- 199) Baragi, V. and R. T. Lovell (1986): Digestive enzyme activities in striped bass from first feeding through larva development. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 115, 478-484.
- 200) Cousin, J. C. B., F. Baudin-Laurencin, and J. Gabaudan (1987): Ontogeny of enzymatic activities in fed and fasting turbot, *Scophthalmus maximus* L. *J. Fish Biol.*, 30, 15-33.
- 201) Hofer, R. and A. N. Uddin (1985): Digestive process during the development of the roach, *Rutilus rutilus* L. *J. Fish. Biol.*, 26, 683-689.
- 202) Pedersen, B. H., E. M. Nilssen, and K. Hjelmeland (1987): Variations in the content of trypsin and trypsinogen in larval herring (*Clupea harengus*) digesting copepod nauplii. *Mar. Biol.*, 94, 171-181.
- 203) Timeyko, V. N. and L. G. Bondarenko (1988): Study of the digestive enzymes in bester, *Husohuso X Acipenser ruthenus*, during the postembryonic period. *J. Ichthyol.*, 28, 48-54.
- 204) Hattori, N., S. Miyashita, Y. Sawada, K. Kato, T. Nasu, T. Okada, O. Murata, and H. Kumai (2001): Lateral muscle development of the Pacific bluefin tuna, *Thunnus thynnus orientalis*, from Juvenile to young adult stage under culture condition. *Suisanzoshoku*, 49 (1), 23-28.
- 205) 宮下 盛・向井良夫・中谷正宏・岡田貴彦・倉田道雄・米島 久・澤田好史・村田 修・熊井英水 (1997)：人工孵化クロマグロの満1年飼育. 平成9年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.110.
- 206) 中務 寛・宮下 盛・村田 修・家戸敬太郎・升間主計・小磯雅彦・照屋和久・熊井英水 (1996)：人工孵化クロマグロの麻酔方法の検討. 平成8年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.114.
- 207) 小磯雅彦・升間主計・照屋和久・田中志信・村田 修・宮下 盛・小田誠二・熊井英水 (1996)：平成8年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.115.
- 208) Miyashita, S., N. Hattori, Y. Sawada, Y. Ishibashi, H. Nakatsukasa, T. Okada, O. Murata, and H. Kumai (1999): Ontogenetic change in oxygen consumption of Bluefin tuna, *Thunnus thynnus*. *Suisanzoshoku*, 47 (2), 269-275.
- 209) Miyashita, S., Y. Sawada, N. Hattori, H. Nakatukasa, T. Okada, O. Murata, and H. Kumai (2000): Mortality of northern bluefin tuna *Thunnus thynnus* due to trauma caused by collision during growout culture. *World Aquaculture*, 31 (4), 632-639.
- 210) Bone, Q. (1978): Locomotor muscle, in "Fish Physiology Locomotion" (ed. by W. S. Hoar and D. J. Randall), Academic Press, New York, pp. 361-424.
- 211) Hulbert, W. C., M. Guppy, B. Murphy, and P. W. Hochachka (1979): Metabolic sources of heat and power in tuna muscles I. Muscle fine structure. *J. Exp. Biol.*, 82, 289-301.
- 212) Peter, R. L. and R. C. L. Hudson (1977): The functional roles of different muscle fibre types identified in the myotomes of marine teleosts: a behavioural, anatomical and histochemical study, *J. Fish Biol.*, 11, 417-430.
- 213) 小畠 渥・部屋博文 (1985)：血合肉含量の迅速測定法. 日水誌, 51 (6), 1001-1004.
- 214) Matsuoka, M. and T. Iwai (1984): Development of the myotomal musculature in the Red sea

- bream, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 50 (1), 29-35.
- 215) Matsuoka, M. (1984): Morphometry of the myotomal muscle fibers in larvae and juveniles of the Red sea bream, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 50 (11), 1811-1816.
 - 216) 福田雅明 (1990): ニシン仔稚魚の体側筋の発達と遊泳速度の変化. 日水誌, 56 (1), 11-17.
 - 217) 塚本勝巳 (1991): 遊泳生理. 魚類生理学 (板沢靖男・羽生 功編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.539-584.
 - 218) Greer-Walker, M. and G. A. Pull (1975): A survey of red and white muscle in marine fish, *J. Fish Biol.*, 7, 295-300.
 - 219) O'Connell, C. P. (1981): Development of organ systems in the northern anchovy, *Engraulis mordax*, and other teleosts, *Amer. Zool.*, 21, 429-446.
 - 220) Carpené, E. and A. Veggetti (1981): Increase in muscle fibers in the lateralis muscle (white portion) of Mugilidae (Pisces, Teleostei). *Experientia*, 37, 191-193.
 - 221) Van Raamsdonk, W. L. Van't Veer, K. Veeken, T. Te Kronnie, and S. De Jager (1982): Fiber type differentiation in fish. *Mol. Physiol.*, 2, 31-47.
 - 222) Brill, R. W. and P. G. Bushnell (1991): Metabolic and cardiac scope of high energy demand teleosts, the tunas. *Can. J. Zool.*, 69, 2002-2009.
 - 223) Finn, R. N., H. J. Fyhn, and M. S. Evjen (1991): Respiration and nitrogen metabolism of Atlantic halibut eggs. *Mar. Biol.*, 108, 11-19.
 - 224) Ronnestad, I., W. M. Koven, A. Tandler, M. Harel, and H. J. Fyhn (1994): Energy metabolism during development of eggs and larvae of gilthead sea bream. *Mar. Biol.*, 120, 187-196.
 - 225) Lindsey, C. C. (1978): Form, function and locomotory habits, in "Fish Physiology vol. VII Locomotion" (ed. W. S. Hoar and D. J. Randall), Academic Press, New York, pp.12-17.
 - 226) Roberts, J. L. (1978): Ram gill ventilation in fish, in "The Physiological Ecology of Tunas" (ed. G. D. Sharp and A. E. Dizon), Academic Press, New York, pp.83-88.
 - 227) Cech, Jr. J. J. (1990): Respirometry, in "Methods for Fish Biology", *American Fisheries Society*, Bethesda, p.335.
 - 228) Brill, R. W. (1987): On the standard metabolic rates of tropical tunas, including the effect of body size and acute temperature change. *Fish. Bull.*, 85 (1), 25-35.
 - 229) Oikawa, S., Y. Itazawa, and M. Gotoh (1991): Ontogenetic change in the relationship between metabolic rate and body mass in a sea bream. *J. Fish Biol.*, 38, 483-496.
 - 230) 板沢靖男 (1991): 呼吸. 魚類生理学 (板沢靖男・羽生 功編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.1-34.
 - 231) Itazawa, Y. and S. Oikawa (1986): A quantitative interpretation of the metabolism-size relationship in animals. *Experientia*, 42, 152-153.
 - 232) Taylor, C. R. (1987): Structural and functional limits to oxidative metabolism: Insights from scaling. *An. Rev. Physiol.*, 49, 135-146.
 - 233) Wieser, W. (1984): A distinction must be made between the ontogeny and the phylogeny of metabolism in order to understand the mass exponent of energy metabolism. *Respiration Physiol.*, 55, 1-9.

- 234) Itazawa, Y. and S. Oikawa (1983): Metabolic rates in excised tissues of carp. *Experientia*, 39, 160-161.
- 235) 服部亘宏・宮下 盛・石橋泰典・村田 修・石谷 大・澤田好史・家戸敬太郎・熊井英水 (1997): 人工孵化クロマグロの衝突死に関する研究－Ⅲ. 遊泳力に関する内部形態の発育. 平成9年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.92.
- 236) 山元憲一・高殿俊行 (1985): 低酸素下におけるウナギ, ドジョウ, ティラピア, アユの酸素消費量の変化. 水産増殖, 33 (2), 103-107.
- 237) 山元憲一・平野 修・伊賀上龍夫・長島 浩・雷田俊明 (1986): 低酸素下におけるウグイ, ゲンゴロウブナ, ギンブナ, ブラックバス, カマツカの酸素消費量の変化. 水産増殖, 34 (3), 179-183.
- 238) 山元憲一・細本 誠・上村達也 (1987): 低酸素下におけるマダイ, アオハタ, カワハギ, キュウセン, ハナオコゼの酸素消費量の変化. 水産増殖, 35 (3), 143-146.
- 239) 山元憲一・平野 修・原 洋一・吉川浩史 (1987): カマツカの低酸素下における呼吸および逃避反応. 魚類学雑誌, 33 (4), 399-404.
- 240) 山元憲一・平野 修 (1988): 低酸素下におけるタイリクバラタナゴ, タモロコ, オイカワ, カワムツ, コイの酸素消費量の変化. 水産増殖, 36 (1), 45-48.
- 241) 山元憲一・平野 修・橋本公浩・高橋正行 (1988): 低酸素下におけるムギツク, ズナガニゴイ, ゼゼラ, ワタカ, ギギ, ブルーギルの酸素消費量の変化. 水産増殖, 36 (2), 127-130.
- 242) 山元憲一・廣中孝始・山下秀行・綿石慶太 (1990): 低酸素下におけるブリ, クラカケトラギス, カサゴ, ネズミゴチ, トラフグの酸素消費量の変化. 水産増殖, 38 (1), 35-39.
- 243) 宮下 盛・服部亘宏・中務 寛・岡田貴彦・澤田好史・那須敏朗・村田 修・熊井英水 (1997): 人工孵化クロマグロの衝突死に関する研究－Ⅰ 遊泳行動の変化と衝突多発期. 平成9年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.92.
- 244) 澤田好史・宮下 盛・服部亘宏・村田 修・小田誠二・倉田道雄・向井良夫・中谷正宏・熊井英水 (1997): 人工孵化クロマグロの衝突死に関する研究－Ⅱ 遊泳力に関する外部形態の発育. 平成9年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.92.
- 245) 水産庁・日本栽培漁業協会 (2000): 平成10年度栽培漁業種苗生産, 入手・放流実績 (全国). 12-13.
- 246) 阿部義孝 (1997): クロマグロ. 現代おさかな辞典 (阿部宗明・本間 昭郎監修), 株式会社エヌ・ティー・エス, 東京, pp.44.
- 247) 阿部義孝 (1995): 水族館とマグロ類の飼育. さいばい, 76, 36-42.
- 248) 荒井 寛 (1996): マグロの飼育と展示. どうぶつと動物園, 48 (6), 186-191.
- 249) Nursall, J.R. (1958): The caudal fin as a hydrofoil, *Evolution*. 12 (1), 116-120.
- 250) Alejev, Y.G. (1977): Nekton., Dr. W. Junk b.v Publishers, Hague, 1-435.
- 251) 中村 泉 (1993): 尾鰭の機能. 海洋と生物, 15 (4), pp.231-236.
- 252) 小島清嗣, 岡本洋一 (1997): 画像解析テキスト NIH-Image 新講座, 洋土社, 東京, pp.178-181.
- 253) 徐 剛, 有本貴文, 井上 実 (1988): マアジ *Trachurus japonicus* の遊泳速度の測定, 日水

- 誌, 54 (9), 1493-1497.
- 254) Blaxter, J. H. S. (1967): Swimming speeds of fish., Bergen, Norway, pp.1-32.
- 255) Plaut, I. (2000): Effects of fin size on swimming performance, swimming behaviour and routine activity of zebrafish, *Danio rerio*. *J. Exp. Biology*, 203, 813-820.
- 256) 東 昭 (1997): 煽ぎ. 生物の動きの辞典, 朝倉書店, 東京, pp.161-163.
- 257) Brown, C. E. and B. S. Muir (1970): Analysis of ram ventilation of fish gills with application to skipjack tuna, *J. Fish. Res. Board Can.*, 27, 1637-1652.
- 258) Blaxter, J. H. S. and W. Dickson (1959): Observaitons on swimming speeds of fish, *J. Cons., Int. Explor. Mer*, 24, 472-479.
- 259) Brett, J. R. and N. R. Glass (1973): Metabolic rates and critical swimming speeds of sockeye salmon in relation to size and temperature, *J. Fish Res. Board Can.*, 30, 379-387.
- 260) 福原 修 (1976): マダイ稚仔魚の形態学的研究-I 鰭の形成について. 南西水研報, 9, 1~11.
- 261) Fukuhara, O. (1977): Some morphological observations on larvae and juvenile of the kurodai, *Mylio macrocephalus* (Sparidae TELEOSTEI) reared in the laboratory. *Bull. Nansei Reg. Fish. Res. Lab.*, 10, 1-16.
- 262) 福原 修・伊藤捷久 (1978): イシダイの鰭および鱗の形成について. 南西水研報, 11, 9~17.
- 263) 村井 衛・川辺勝俊・加藤憲司・隆島史夫 (1991): シマアジ仔稚魚の鰭と鱗の発育. 水産増殖, 39 (2), 201-210.
- 264) Gosline, W. A. (1973): Functional morphology and classification of teleostean fishes. The university press of Hawaii, 208p.
- 265) Munday, B. L., P. J. O'Donoghue, M. Watts, K. Rough, and T. Hawkesford (1997): Fatal encephalitis due to the scuticociliate *Uronema nigricans* in sea-caged, southern, bluefin tuna *Thunnus maccoyii*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 30, 17-25.
- 266) Munday, B. L. and G. M. Hallegraeff (1998): Mass mortality of captive southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) in April/May 1996 in Boston Bay, South Australia: a complex Diagnostic Problem. *Fish Pathology*, 33, 343-350.
- 267) 佐藤 守 (1981): ビタミン. 魚介類の微量成分 (池田静徳編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.143-208.
- 268) 青江 弘 (1973): ビタミン. 養魚飼料学 (橋本芳郎編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.110-159.
- 269) 田中祐志・宮下 盛・滝井健二・瀬岡 学・熊井英水 (1995): 養成クロマグロ卵の比重と浮上速度. 平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.61.
- 270) 原田輝雄・熊井英水・村田 修・中村元二・宮下 盛・前田茂樹 (1979): クロマグロの人工種苗生産の研究-III ふ化に及ぼす海水の比重と pH の影響. 昭和54年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.86.
- 271) 魚谷逸朗・松崎加奈恵・牧野祐子・野田聖無・稲村 修・堀川 貢 (1981): 北西オーストラリア海域産マグロ・カツオ類稚仔の食性, 日水誌, 47 (9), 1165-1172.
- 272) Sawada, Y., S. Miyashita, M. Aoyama, M. Kurata, Y. Mukai, T. Okada, O. Murata, and H.

Kumai (2000): Rotifer-size selectivity and optimal feeding density of bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, larvae. *Suisanzoshoku*, 48 (2), 169-177.

- 273) 村田 修・山本眞司・宮下 盛・高井清美・那須敏朗・家戸敬太郎・小野博行・熊井英水 (2000) : マサバ人工孵化仔稚魚の飼育と成長. 平成 12 年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.44.